



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Sistema portátil para monitoramento e identificação de falhas
em motores de indução trifásicos através da técnica da
Análise da Assinatura Elétrica**

Marcos Henrique Pitoli

Itajubá, Dezembro de 2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Marcos Henrique Pitoli

**Sistema portátil para monitoramento e identificação de falhas
em motores de indução trifásicos através da técnica da
Análise da Assinatura Elétrica**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador:
Ângelo José Junqueira Rezek

**Dezembro de 2013
Itajubá**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá
Bibliotecária Jacqueline Rodrigues de Oliveira Balducci- CRB_6/1698

P685s

Pitoli, Marcos Henrique.

Sistema portátil para monitoramento e identificação de falhas em motores de indução trifásicos através da técnica da Análise da Assinatura Elétrica. / Marcos Henrique Pitoli. – Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

144 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Identificação de falhas. 2. Motor de indução trifásico. 3. Análise da assinatura elétrica. I. Resek, Ângelo José Junqueira, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Marcos Henrique Pitoli

**Sistema portátil para monitoramento e identificação de falhas em
motores de indução trifásicos através da técnica da Análise da
Assinatura Elétrica**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 6 de
Dezembro de 2013, conferindo ao autor o título de *Mestre em
Engenharia Elétrica*.

Banca Examinadora:

Prof. Ângelo José Junqueira Rezek (Orientador)

Prof. Edson da Costa Bortoni

Prof. António Tadeu Lyrio de Almeida

Prof. Adriana Aparecida Santos Izidoro

**Itajubá
2013**

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por todas as conquistas e oportunidades em minha vida.

À empresa Semeq que abriu as portas e me possibilitou a realização de mais esse sonho.

À toda a minha família que esteve sempre presente em todos os momentos dando todo o apoio necessário.

A todos os funcionários dos laboratórios de Unifei pela ajuda com equipamentos e instruções.

A todos os amigos e funcionários da empresa Semeq pela ajuda prestada durante esses anos, em especial ao presidente da empresa Eduardo Beltrame que com seu espírito inovador permitiu e apoiou o desenvolvimento desse projeto.

Por fim, agradeço a todos os amigos que de forma direta ou indireta me ajudaram na realização desse trabalho.

Sumário

Introdução	15
Objetivo do trabalho	15
Estrutura da dissertação	15
Capítulo 1. Conceituação	17
1.1 Manutenção	17
1.1.1 História da Manutenção	19
1.1.2 Tipos de manutenção	20
1.2 O Motor de indução trifásico (MIT)	24
1.2.1 Partes constituintes	24
1.2.2 Modos potenciais de falhas em motores elétricos	31
1.3 Manutenção preditiva de motores de indução trifásicos	40
1.3.1 Técnicas de monitoramento Off-line	42
1.3.2 Técnicas de monitoramento On-line	43
Capítulo 2. Análise da Assinatura Elétrica (ESA)	50
2.1 Definições ESA	50
2.2 Revisões Históricas	51
2.3 Efeitos das falhas nas correntes do estator	53
2.3.1 Barras Quebradas	54
2.3.2 Excentricidade no entreferro	64
2.3.3 Defeitos nos rolamentos	71
2.3.4 Defeitos observados na carga e no sistema de transmissão	76
2.3.5 Defeitos nos enrolamentos do estator	79
2.3.6 Qualidade de energia	84
Capítulo 3. Desenvolvimento do Equipamento	89
3.1 Labview	90
3.2 Modelo de negócio da prestação de serviços	91
3.3 Desenvolvimento do hardware	93
3.3.1 Eletrônica	93
3.3.2 Seleção das garras de tensão e sensores de corrente	95
3.3.3 Seleção da DAQ	96
3.3.4 Bateria	97
3.4 Desenvolvimento do Software	97
3.4.1 Tela de Configurações	98
3.4.2 Power	100
3.4.3 Eccentricity	106
3.4.4 Rotor Evaluation	106
3.4.5 In rush	107
3.5 Software de análise	108
3.5.1 Power	108
3.5.2 Eccentricity	112
3.5.3 Rotor Evaluation	113
3.5.4 In rush	113

3.6 Software de reprocessamento do sinal	115
Capítulo 4. Bancada experimental e Resultados	119
4.1 Montagem da bancada experimental	119
4.2 Calibração	124
4.3 Falhas geradas em laboratório	125
4.3.1 Barras quebradas	126
4.3.2 Desbalanço de tensão	126
4.3.3 Curto entre espiras	128
4.4 Resultados obtidos	128
4.4.1 Resultados obtidos em laboratório	129
4.4.2 Resultados obtidos em campo	135
Capítulo 5. Conclusão e Recomendações para Trabalhos Futuros	137
5.1 Conclusões	137
5.2 Recomendações para trabalhos futuros	137
Referências	139
ANEXO A	144

Resumo

O mercado globalizado e a concorrência crescente geram uma busca contínua pelo status de excelência em cada etapa da produção, tornando vital o setor de manutenção na busca por melhores resultados. Muitas pesquisas voltadas a encontrar novas técnicas para o monitoramento de motores de indução, predominantes na indústria, têm sido realizadas nos últimos anos com o intuito de garantir disponibilidade desses equipamentos, obter qualidade, produtividade e segurança nas linhas de produção. Uma das técnicas de manutenção preditiva mais nova é a Análise da Assinatura Elétrica que, utilizando das informações das tensões e correntes de alimentação da máquina, é capaz de detectar falhas no circuito de alimentação, motor, carga e transmissão.

Assim, essa dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um equipamento portátil capaz de aplicar a técnica da Análise da Assinatura Elétrica a fim de prever falhas e monitorar a condição de operação de motores de indução. Para isso é feito uma revisão bibliográfica de outros autores que comprovaram a eficácia da técnica, além de medições em alguns motores com avarias conhecidas utilizando do equipamento proposto.

Abstract

The global market and the rising competition generate a continuous search for the status of excellence in each production step, making the maintenance sector vital, since it is responsible for searching for better results. Many researches focused on develop new techniques for monitoring of induction motors, prevalent in the industry, have been conducted in the recent years in order to ensure equipment availability, reach quality, increase productivity and safety in production lines. One of the newest techniques of predictive maintenance is the Electric Signature Analysis that by using the information of the voltages and currents of the Machine, is able to detect faults in power circuit, engine, transmission and load circuit.

Thus, this dissertation aims at the development of a portable device capable of applying the Electrical Signature Analysis technique to predict failures and monitor the induction motors operation condition. For this, a literature review of other authors who have proved the effectiveness of the technique has been done, and also measurements on some motors with known faults, using the proposed equipment.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Partes constituintes do motor de indução

Figura 1.2 – Vista explodida do motor de indução

Figura 1.3 – Estator de um motor de indução

Figura 1.4 – Carcaça de um motor de indução

Figura 1.5 – Núcleo e estator de um motor de indução

Figura 1.6 – Caixa de ligação de um motor de indução

Figura 1.7 – Rotor motor de indução a) bobinado b) gaiola de esquilo

Figura 1.8 - Estatística de Falhas em Motores de Indução Trifásicos.

Figura 1.9 - Estatística de Falhas no Estator de Motores de Indução Trifásicos.

Figura 1.10 - Possíveis modos de ocorrências de falha nos enrolamentos

Figura 1.11 - Falhas nos enrolamentos do estator de um motor de indução

Figura 1.12 - Estatísticas de falhas no rotor de Motores de Indução Trifásicos.

Figura 1.13 - Motor de indução com barras quebradas

Figura 1.14 - Seção transversal do motor de indução: (a) saudável, (b) com excentricidade estática (c) com excentricidade dinâmica.

Figura 1.15 - Exemplo de espectro de vibração

Figura 1.16 - Exemplo de termografia elétrica

Figura 1.17 - Exemplo de termografia mecânica

Figura 1.18 - Exemplo de análise acústica

Figura 1.19 - Fluxograma das técnicas de ESA e MCSA

Figura 2.1 - Exemplo do fluxo magnético em um motor a) saudável b) com falha de barra quebrada

Figura 2.2 - Espectro de corrente para 2,3,5 e 7 barras quebradas

Figura 2.3 - Cálculo estimado do número de barras quebradas no rotor

Figura 2.4 - Espectro de potência de um motor sem carga (a) saudável (b) com 1 barra quebrada

Figura 2.5 - Espectro de potência de um motor sem carga com (a) 5 barras quebradas (b) 12 barras quebradas

Figura 2.6 - Espectro de potência de um motor com meia carga (a) saudável (b) com 1 barra quebrada

Figura 2.7 - Espectro de potência de um motor com meia carga com (a) 5 barras quebradas (b) 12 barras quebradas

Figura 2.8 - Espectro de potência de um motor com carga total (a) saudável (b) com 1 barra quebrada

Figura 2.9 - Espectro de potência de um motor com carga total com (a) 5 barras quebradas (b) 12 barras quebradas

Figura 2.10 - Espectro de potência de motor a) saudável b) com barras quebradas

Figura 2.11 - Efeito remoinho

Figura 2.12 - Teste de partida para motor saudável

Figura 2.13 - Teste de partida para motor com barras quebradas

Figura 2.14 - Espectro de potência de um motor saudável (a) sem carga (b) com carga

Figura 2.15 - Espectro de potência de motor sem carga com (a) 25% (50%) de excentricidade estática

Figura 2.16 - Espectro de potência de motor com carga total com (a) 25% (b) 50% de excentricidade estática

Figura 2.17 - Espectro de potência de um motor saudável e sem carga

Figura 2.18 - Espectro de potência de motor com excentricidade mista sem carga

Figura 2.19 - Espectro de potência de um motor saudável com carga total

Figura 2.20 - Espectro de potência de um motor com excentricidade mista com carga total

Figura 2.21 - Espectro de potência de um motor com excentricidade

Figura 2.22 - Rolamento de esfera

Figura 2.23 - Espectro de potência de motor com furo de 2mm na pista interna do rolamento sem carga

Figura 2.24 - Espectro de potência de motor com furo de 4mm na pista interna do rolamento sem carga

Figura 2.25 - Espectro de potência de motor com furo de 2mm na pista interna do rolamento com carga total

Figura 2.26 - Espectro de potência de motor com furo de 4mm na pista interna do rolamento com carga total

Figura 2.27 - Espectro de potência de motor com furo de 2mm na pista externa do rolamento sem carga

Figura 2.28 - Espectro de potência de motor com furo de 4mm na pista externa do rolamento sem carga

Figura 2.29 - Espectro de potência de motor com furo de 2mm na pista externa do rolamento com carga total

Figura 2.30 - Espectro de potência de motor com furo de 4mm na pista externa do rolamento com carga total

Figura 2.31 - Espectro de potência para motor com (a) redutor saudável (b) falha no redutor

Figura 2.32 - Espectro de potência de um motor sem carga (a) saudável (b) com 5% de curto

Figura 2.33 - Espectro de potência de um motor sem carga com curto de (a) 15% (b) 30%

Figura 2.34 - Espectro de potência de um motor com carga (a) saudável (b) com 5% de curto

Figura 2.35 - Espectro de potência de um motor com carga total com curto de (a) 15% (b) 30%

Figura 2.36 - Triângulo das potências

Figura 3.1 - Modelo de negócio da prestação de serviços

Figura 3.2 - Diagrama de blocos do hardware

Figura 3.3 - Placa de circuito impresso desenvolvida

Figura 3.4 - Garras de tensão

Figura 3.5 - Tela de configurações de seleção de O.S. software desenvolvido

Figura 3.6 - Tela de configurações do software desenvolvido

Figura 3.7 - Tela do ensaio Power do software desenvolvido

Figura 3.8 - Conexão do equipamento

Figura 3.9 - Diagrama fasorial com garras trocadas

Figura 3.10 - Indicação do sentido da corrente nas garras amperimétricas

Figura 3.11 - Diagrama fasorial com garra invertida

Figura 3.12 - Fator de degradação

Figura 3.13 - Fator de tensão harmônica

Figura 3.14 - Tela do ensaio Eccentricity do software desenvolvido

Figura 3.15 - Tela do ensaio Rotor Evaluation do software desenvolvido

Figura 3.16 - Tela do ensaio In Rush do software desenvolvido

Figura 3.17 - Tela Banco Power do software de análise

Figura 3.18 - Tela Diagrama Fasorial do software de análise

Figura 3.19 - Tela Gráfico de Barras de Harmônicos do software de análise

Figura 3.20 - Tela Ondas no tempo do software de análise

Figura 3.21 - Tela Power do software de análise

Figura 3.22 - Tela Dados Relevantes do software de análise

Figura 3.23 - Tela Eccentricity do software de análise

Figura 3.24 - Tela Rotor Evaluation do software de análise

Figura 3.25 - Tela In Rush do software de análise

Figura 3.26 - Seleção do arquivo no software de reprocessamento de sinal

Figura 3.27 - Tela inicial do software de reprocessamento de sinal

Figura 3.28 - Software de reprocessamento de sinal – Fases trocadas

Figura 3.29 - Software de reprocessamento de sinal – Fases corrigidas

Figura 3.30 - Software de reprocessamento de sinal – Fase invertida

Figura 3.31 - Software de reprocessamento de sinal – Fase corrigida

Figura 3.32 - Software de reprocessamento de sinal – Arquivo Salvo

Figura 3.33 - Software de reprocessamento de sinal – Mensagem de erro

Figura 4.1 - Bancada de desenvolvimento e calibração

Figura 4.2 - Esquema elétrico das ligações

Figura 4.3 - Instrumento para medição de tensão

Figura 4.4 - Instrumento para medição de corrente

Figura 4.5 - Instrumento para medição das potências

Figura 4.6 - Instrumento para medição da rotação

Figura 4.7 - Instrumento para medição da frequência

Figura 4.8 - Esquema elétrico montado

Figura 4.9 - Rotor com barras quebradas

Figura 4.10 - Esquema elétrico montado para simular desbalanço na alimentação

Figura 4.11 - Banco de resistores

Figura 4.12 - Motor com curto entre espiras

Figura 4.13 - Resultado da medição do motor saudável

Figura 4.14 - Efeito redemoinho para motor saudável

Figura 4.15 - Resultado da medição do motor com 1 barra quebrada

Figura 4.16 - Efeito redemoinho do motor com 1 barra quebrada

Figura 4.17 - Resultado da medição do motor com 2 barras quebradas

Figura 4.18 - Efeito redemoinho do motor com 2 barras quebradas

Figura 4.19 - Resultado da medição do motor com 3 barras quebradas

Figura 4.20 - Efeito redemoinho do motor com 3 barras quebradas

Figura 4.21 - Resultado para motor saudável

Figura 4.22 - Resultado para curto entre espiras

Figura 4.23 - Caso real: alto índice de harmônicos

Figura 4.24 - Caso real: defeito no inversor

Lista de tabelas

Tabela 1.1 - Custo total da manutenção por faturamento bruto [1]

Tabela 1.2 - Indicadores de Disponibilidade

Tabela 1.3 - Aplicação dos recursos na manutenção

Tabela 1.4 – Falhas identificadas por técnicas de monitoramento offline

Tabela 1.5 – Comparativo entre as técnicas de monitoramento

Tabela 2.1 – Tabela referência para análise de barras quebradas

Tabela 2.2 – Diferença entre as amplitudes das frequências medidas

Tabela 2.3 – Resumo dos resultados

Tabela 2.4 – Resumo dos resultados para excentricidade estática

Tabela 2.5 – Resumo dos resultados para excentricidade mista

Tabela 2.6 – Resumo dos resultados para avaria na pista interna

Tabela 2.7 - Resumo dos resultados para avaria na pista externa

Tabela 2.8 - Resumo dos resultados obtidos

Tabela 2.9 - Variação da impedância negativa para desequilíbrio de 0,8%

Tabela 2.10 - Variação da impedância negativa para desequilíbrio de 1%

Tabela 3.1 - Garra de corrente 24-3001

Tabela 3.2 - Garra de corrente MN353

Tabela 3.3 - DAQ utilizada

Tabela 3.4 - Bateria utilizada

Tabela 3.5 - Limite de THD segundo IEEE 519-1992

Tabela 4.1 - Dados nominais dos motores da bancada

Tabela 4.2 - Dados nominais dos motores utilizados

Tabela 4.3 - Medição após calibração

Tabela 4.4 - Medição dos ângulos

Tabela 4.5 - Resumo dos resultados obtidos

Tabela 4.6 - Motor com alimentação a) balanceada b) desbalanceada

Lista de abreviaturas e símbolos

ESA - Análise da Assinatura Elétrica

MIT - Motores de Indução Trifásicos

ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção

TMF - Tempo Médio entre as Falhas

UMP - Unbalanced Magnetic Pull

MCA - Análise do circuito do motor

RIC - Rotor Influence Test

MCSA - Motor Current Signature Analysis

THD - Distorção Total Harmônica

CF - Fator de Crista

FFT - Transformada Rápida de Fourier

WVD - Distribuição Wigner-Ville

TC - Transformadores de Corrente

TP - Transformadores de Potencial

OS - Ordem de Serviço

FLA - Porcentagem de carga

NEMA - National Electrical Manufacturers Association

HVF - Fator de Tensão Harmônico

Introdução

Objetivo do trabalho

O objetivo desse trabalho é desenvolver um equipamento portátil capaz de realizar ensaios baseados na técnica da Análise da Assinatura Elétrica (ESA) em motores de indução trifásicos gaiola de esquilo a fim de detectar avarias e monitorar a condição de operação de tais máquinas. Para tanto, será necessário um estudo histórico de outros autores que aplicaram tal técnica, além do desenvolvimento do hardware e software necessários para aquisição, condicionamento, processamento dos sinais e análise de resultados.

O trabalho visa também comprovar a eficácia do equipamento na detecção das falhas discutidas através de ensaios realizados em laboratório em motores que apresentem algumas das avarias estudadas, executando ensaios práticos antes e após as falhas serem progressivamente aplicadas aos motores além de demonstrar alguns resultados obtidos em campo pelo equipamento.

Estrutura da dissertação

No capítulo 1 é apresentado um breve histórico sobre manutenção bem como uma explicação sobre o motor de indução trifásico demonstrando suas principais partes constituintes e modos potenciais de falha. Nesse capítulo também são comentadas as principais técnicas para avaliação e monitoramento dessas máquinas utilizadas pela manutenção preditiva.

O capítulo 2 faz uma revisão histórica de estudos voltados às técnicas da Análise da Assinatura Elétrica escolhida para ser aplicada no equipamento proposto, mostrando casos reais de sucesso na detecção de algumas das principais avarias existentes em motores de indução.

O capítulo 3 mostra alguns detalhes do desenvolvimento do equipamento proposto, comentando sobre hardware e software do mesmo. O capítulo conta ainda com a demonstração do software de coleta, análise e de reprocessamento de dados.

O capítulo 4 trata da bancada experimental utilizada para desenvolvimento e calibração do equipamento e da bancada utilizada para os testes comprobatórios. O capítulo mostra ainda como algumas avarias foram geradas nos motores disponibilizados e os resultados obtidos nas medições realizadas pelo equipamento antes e após a geração das falhas, além de demonstrar alguns resultados reais obtidos nos últimos meses, quando o equipamento desenvolvido foi utilizado em indústrias de diversos ramos.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões referentes aos objetivos propostos e os resultados alcançados além de indicar sugestões para trabalhos futuros utilizando como base o equipamento proposto.

1. Conceituação

1.1 Manutenção

A grande concorrência derivada do mercado globalizado gera a necessidade de que as empresas modernas passem por melhorias contínuas em todos seus setores produtivos buscando o status de excelência em cada um deles. Assim, empresas de todos os ramos buscam maior competitividade através de novas ferramentas e tecnologias de gerenciamento procurando garantir maior qualidade e produtividade em seus produtos, processos e serviços.

A manutenção é um setor que participa diretamente nessa busca pela excelência, tendo responsabilidade direta sobre a disponibilidade dos ativos, qualidade e segurança da produção, sendo já há algum tempo encarado com a merecida importância pelos gestores e considerado estratégico para se obter os melhores resultados produtivos e operacionais. Por meio de uma manutenção sistemática bem realizada, é possível prever e evitar falhas que poderiam causar paradas inesperadas, acidentes, danos ao ambiente e perda de qualidade do produto final.

Por definição, manutenção é um conjunto de atividades aplicadas ao equipamento ou processo que visa garantir a continuidade de sua função dentro dos parâmetros de qualidade, disponibilidade, custos e segurança adequados. O processo de manutenção deve começar antes da aquisição do equipamento e prosseguir até que esse seja descartado, sendo que sua principal função é o prolongamento de sua vida útil, garantindo os itens citamos acima. Os resultados desse processo serão melhores quanto maior for a eficiência da gestão de manutenção.

Nas últimas décadas, o setor de manutenção tem sofrido alterações significativas devido ao constante aumento na variedade e complexidade das instalações produtivas e as exigências do mercado cada vez mais competitivo. A necessidade de conhecimento técnico na área cresce cada vez mais, o que demanda atualização, também constante, dos profissionais e das técnicas aplicadas à área de manutenção.

A Tabela 1.1 mostra o custo total de manutenção por faturamento bruto no Brasil nos últimos anos.

Tabela 1.1 - Custo total da manutenção por faturamento bruto [1]

Ano	Custo Total da Manutenção / Faturamento Bruto
2013	4,30%
2011	3,95%
2009	4,14%
2007	3,89%
2005	4,10%
2003	4,27%
2001	4,47%
1999	3,56%
1997	4,39%
1995	4,26%

Observa-se pelos dados da Abraman (Associação Brasileira de Manutenção) que em 2011 o custo da manutenção por faturamento bruto foi de 3,95%, esse valor representa um gasto de aproximadamente 150 bilhões de reais. O montante de dinheiro gasto mostra que os investimentos no setor são consideráveis e a necessidade de melhorias contínuas no desenvolvimento de tecnologias voltadas à prevenção de falhas bem como na capacitação do pessoal envolvido, a fim de reduzir esses custos a valores mínimos e garantir a qualidade do produto final.

Em [1] encontram-se alguns outros dados referentes à situação da manutenção no Brasil mostrando a importância do setor e as melhorias já obtidas devido aos investimentos em técnicas, capacitação de pessoal e equipamentos destinados a manutenção. Vê-se, por exemplo, um aumento de 5,48% na disponibilidade operacional dos equipamentos no período estudado.

Tabela 1.2 - Indicadores de Disponibilidade

Indicadores de Disponibilidade [%]								
Tipo	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011
Disponibilidade Operacional	85,82	89,3	91,36	89,48	88,2	90,82	90,27	91,3

1.1.1 História da Manutenção

A evolução das tecnologias de manutenção acompanha o desenvolvimento industrial da humanidade à medida que, com o aprimoramento dos processos produtivos e com a globalização do mercado, o setor de manutenção recebeu investimentos e estudos voltados ao aprimoramento das técnicas utilizadas para tal fim. Assim, as tecnologias hoje existentes no setor são frutos de décadas de pesquisas impulsionadas por crescimentos e especializações no setor produtivo.

Segundo [2], a história da manutenção pode ser dividida em 3 períodos:

Primeiro período - Manutenção da 1ª geração (até a 2ª Guerra Mundial): até a Primeira Guerra Mundial, a manutenção tinha importância secundária nas indústrias, os equipamentos eram sempre super dimensionados e os projetos normalmente muito simples, assim, o reparo era de fácil execução e a preocupação com paradas inesperadas não existia. Apenas a limpeza e lubrificação dos equipamentos já eram suficientes e não havia a necessidade de realizá-los de maneira sistemática.

Com a Primeira Guerra Mundial, em 1914, e a produção em série de Ford, as fábricas passaram a adotar programas de metas de produção e surgiram as primeiras equipes voltadas exclusivamente à realização de manutenção em equipamentos que apresentassem defeitos de forma a mantê-los fora da linha de produção o menor tempo possível.

A Segunda Guerra Mundial impulsionou mais uma vez o setor produtivo mundial criando a necessidade de maior rapidez na produção e métodos para observar falhas antes que essas ocorressem começaram a ser estudados com o intuito de evitar paradas inesperadas.

Segundo período – Manutenção de 2ª geração (início na década de 1950): com o fim da guerra, a evolução da aviação comercial e da indústria eletrônica a necessidade crescente por produtos nos diversos setores industriais impulsionou a mecanização das indústrias, surgindo máquinas complexas e em grande quantidade. Com a preocupação com paradas inesperadas de equipamentos e falhas na produção nasceu o conceito de manutenção preventiva e a ideia de que falhas podiam e deviam ser evitadas. O custo da manutenção aumentou e investimentos foram feitos para que fosse possível prever falhas em equipamentos críticos.

Terceiro período – Manutenção de 3ª geração (iniciado em meados da década de 1970): com a difusão dos microprocessadores, a sofisticação e diversificação dos equipamentos de medidas o setor passou a desenvolver critérios para previsão e predição de falhas surgindo assim o conceito de manutenção preditiva onde buscaram-se novas maneiras de maximizar a produção, aumentar a vida útil dos equipamentos, obter maior qualidade dos produtos e manter um controle dos custos, tudo isso com segurança e sem danos ao ambiente tornando a indústria capaz de competir no mercado globalizado e exigente por qualidade, preço e disponibilidade de produtos e serviços.

1.1.2 Tipos de manutenção

Apesar de certas divergências quanto à classificação existem basicamente 3 tipos de manutenção: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva. A Tabela 1.3 abaixo mostra a aplicação dos recursos na manutenção no Brasil.

Tabela 1.3 - Aplicação dos recursos na manutenção [1]

Aplicação dos Recursos na Manutenção [%]				
Ano	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva	Outros
2011	27,4	37,17	18,51	16,92
2009	29,85	38,73	13,74	17,68
2007	25,61	38,78	17,09	18,51
2005	32,11	39,03	16,48	12,38
2003	29,98	35,49	17,76	16,77
2001	28,05	35,67	18,87	17,41
1999	27,85	35,84	17,17	19,14
1997	25,53	28,75	18,54	27,18
1995	32,8	35	18,64	13,56

Observa-se que no território nacional a manutenção preditiva ainda é menos utilizada apesar de todo seu potencial, representando atualmente apenas 18,51% dos recursos aplicados às diversas técnicas de manutenção, demonstrando a necessidade de maiores investimentos e estudos nos métodos envolvidos para essa prática, com o intuito de diminuir principalmente

as paradas inesperadas geradas pela manutenção corretiva e paradas desnecessárias realizadas devido às falhas no planejamento da preventiva.

Essas técnicas de manutenção serão brevemente discutidas a seguir.

a) Manutenção corretiva

É a técnica de manutenção mais antiga que, por ser de simples aplicação e pela falta de gestão presente em algumas unidades, ainda é muito utilizada.

É uma técnica totalmente reativa e baseia-se na atuação em um equipamento apenas quando este falhe ou tenha um rendimento fora do esperado, desta forma, nenhum dinheiro é gasto antes que a falha aconteça. Mesmo assim, é a técnica que gera o maior custo associado, já que gastos com estoques de peças sobressalentes, altos custos com horas extras, elevado tempo de paralisação da máquina e baixa disponibilidade de produção, ocorrem.

Segundo [3], a velha máxima que as máquinas quebrarão no pior momento é uma realidade, já que normalmente a quebra ocorrerá quando a demanda de produção é maior e neste momento a equipe de manutenção deve reagir, inspecionar a máquina, identificar as falhas e realizar os reparos necessários. Será então necessário manter as peças em estoque ou pagar o preço do mercado por elas e arcar com o tempo de paralisação necessário para o conserto da falha.

Hoje em dia, poucas empresas trabalham verdadeiramente com essa filosofia, pois normalmente realizam-se pequenas tarefas preventivas, como lubrificação e ajustes na máquina.

A manutenção corretiva pode ainda ser subdividida em:

- i) **Manutenção corretiva planejada:** é a manutenção realizada em função do acompanhamento preditivo, da manutenção sensitiva ou de outro método que se julgue capaz de se detectar alguma avaria que indique a necessidade de intervenção no equipamento.

- ii) Manutenção corretiva não planejada: é a manutenção realizada apenas após a falha ser identificada e causar a parada do equipamento ou a perda significativa de seu desempenho tendo a característica de ser simplesmente reativa comentada previamente e de ser o método mais caro de manutenção.

b) Manutenção Preventiva

A ideia da Manutenção Preventiva é de substituir peças ou componentes da máquina antes que uma falha aconteça, para isso faz-se uso do “Tempo Médio entre as Falhas” (TMF), que são dados estatísticos que determinam o tempo provável que ocorrerá determinada falha em uma máquina específica.

Em resumo, elabora-se um plano de manutenção preventiva baseado no TMF para a máquina em questão e sempre que o plano indicar é realizada a intervenção. O grande problema dessa técnica é que ela assume que as máquinas degradarão sempre em um tempo típico de sua classificação em particular, porém, o modo de operação da máquina afeta diretamente sua vida útil bem como de seus componentes constituintes, assim, pode acontecer do plano adotado ser muito conservador e peças serem substituídas sem necessidade ou, em um caso pior, uma falha acontecer antes do plano feito baseado no TMF indicar a intervenção. Outra desvantagem dessa técnica é de não possibilitar a programação da parada para reparo no momento de menor impacto na produção.

Na prática, a implementação da Manutenção Preventiva varia bastante, algumas empresas optam por programas limitados que consistem apenas em lubrificação e pequenos ajustes na máquina outros programas mais completos abrangem lubrificação, ajustes, programação de reparos, recondicionamento de máquinas etc. De qualquer forma, em todos os planos o planejamento da intervenção são baseados no tempo previsto de falha.

c) Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva é um programa de manutenção preventiva melhorado, também conhecido como “Manutenção Baseada na Condição”. A intervenção é realizada baseada na

condição da máquina e não no tempo, através de um monitoramento mecânico, do rendimento do sistema e de outras variáveis que indicam o desenvolvimento de uma falha, permitindo que o equipamento opere o maior tempo possível e realizando a intervenção baseada em dados e não em suposições.

A escolha de quais técnicas de monitoramento utilizar na manutenção preditiva depende do tipo de equipamento que se deseja efetuar o acompanhamento, do impacto do mesmo na produção (da real importância dessa máquina, levando em conta os custos de sua manutenção e de parada dessa máquina) e dos objetivos que se deseja alcançar com o programa. Assim, um programa abrangente de gerência de manutenção preditiva utiliza uma combinação de técnicas de monitoramento de diversas variáveis da máquina para obter a real condição da mesma e, baseado nesses dados reais, programar as atividades de manutenção conforme o necessário.

Uma das vantagens desse método é que a falha pode ser identificada em um estágio inicial, assim, a programação para a intervenção pode ser feita adequadamente e o reparo pode ser realizado no momento de menor impacto na produção, evitando gastos com horas extras e compras de peças ou ferramentas à “preço de mercado”. Porém, segundo [3], essa premissa é muito simples para se caracterizar o que é a manutenção preditiva atual. A mesma trata-se de um meio de se melhorar a produtividade, a qualidade do produto, o lucro, e a efetividade global das plantas industriais de manufatura e de produção. Assim podemos citar algumas vantagens da implementação de um programa de manutenção preditiva bem planejado:

- i) Redução dos custos de manutenção
- ii) Redução de falhas nas máquinas
- iii) Redução do tempo de parada para reparo
- iv) Redução no estoque de peças sobressalentes
- v) Aumento da vida útil de componentes, equipamentos e instalações;
- vi) Aumento da produção
- vii) Melhora na segurança de processos, equipamentos, instalações e pessoas.
- viii) Verificação das condições do equipamento novo
- ix) Verificação dos reparos realizados em equipamentos antigos
- x) Aumento do lucro global
- xi) Ganhos expressivos ao meio ambiente.

- xii) Aumento da confiabilidade;
- xiii) Melhora da qualidade do produto final;

Segundo [4] a estruturação da manutenção preditiva, pode ser feita em 8 etapas:

- i) Pesquisa das reais necessidades (custos);
- ii) Seleção de componentes/equipamentos prioritários em classes ABC;
- iii) Coleta de informações externas à empresa para obtenção de tecnologias;
- iv) Estrutura para execução e fluxo do sistema de manutenção preditiva;
- v) Treinamento dos responsáveis;
- vi) Testes;
- vii) Seleção de software e hardware;
- viii) Desenvolvimento gradual do sistema na empresa:
 - a) Seleção e ampliação dos equipamentos e partes que são objetos da manutenção preditiva;
 - b) Desenvolvimento de equipamentos e tecnologias de diagnóstico.

Na prática, a técnica de manutenção preditiva deve permitir a coleta das informações da máquina em operação (preferencialmente) e gerar resultados capazes de serem analisados pela tendência de evolução das falhas, facilitando a tomada de decisão e garantindo que avarias possam ser observadas em estágio inicial.

1.2 O Motor de indução trifásico (MIT)

Os motores de indução trifásicos são provavelmente hoje as máquinas rotativas mais importantes no setor industrial já que são amplamente utilizados nas mais variadas aplicações e estão presentes em praticamente todos os tipos de acionamentos. Eles são adequados para o uso em cargas que exigem velocidades constantes e agora, com o barateamento dos semicondutores de potência, variáveis.

Entre os fatores que levaram os motores de indução a serem tão bem aceitos estão os fatos de possuírem construção simples e robusta, exigirem manutenção reduzida em comparação com outras máquinas rotativas, estarem disponíveis em uma ampla faixa de conjugados, poderem

ser projetados para operar com diferentes números de fases, frequências, tensões e fontes de alimentação.

Outras vantagens citadas em [5] dos motores de indução trifásicos são:

- i) Menor custo;
- ii) Manutenção mais simples e menos frequente;
- iii) Menor relação peso/potência;
- iv) Inexistência de comutador;
- v) Permitir velocidades tangenciais e potências limites superiores aos de corrente contínua.

Apesar da técnica de ESA poder ser aplicada a outras máquinas como, por exemplo, motores síncronos ou de corrente contínua, devido a predominância dos motores de indução no mercado eles foram o foco desse estudo.

Em toda essa dissertação, o termo “motor de indução” é usado como referência ao motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo, salvo quando mencionado o contrário.

A seguir serão discutidas as partes constituintes de um motor de indução trifásico e suas principais falhas características.

1.2.1 Partes constituintes

Em [5] pode ser visto um estudo sobre as principais partes constituintes do motor de indução. A Figura 1.1 mostra a estrutura da máquina e suas principais partes constituintes em vista de corte, que se compõe basicamente de dois elementos: o estator e o rotor. Na Figura 1.2 tem-se uma vista explodida do motor de indução.

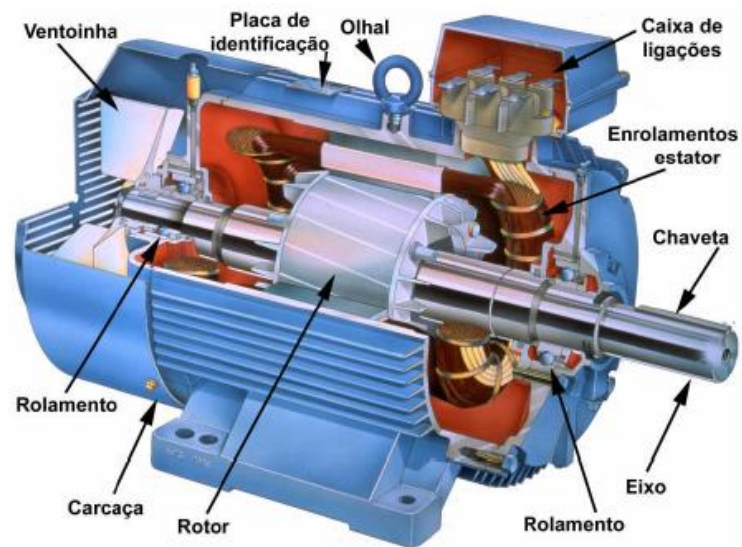


Figura 1.1 - Partes constituintes do motor de indução

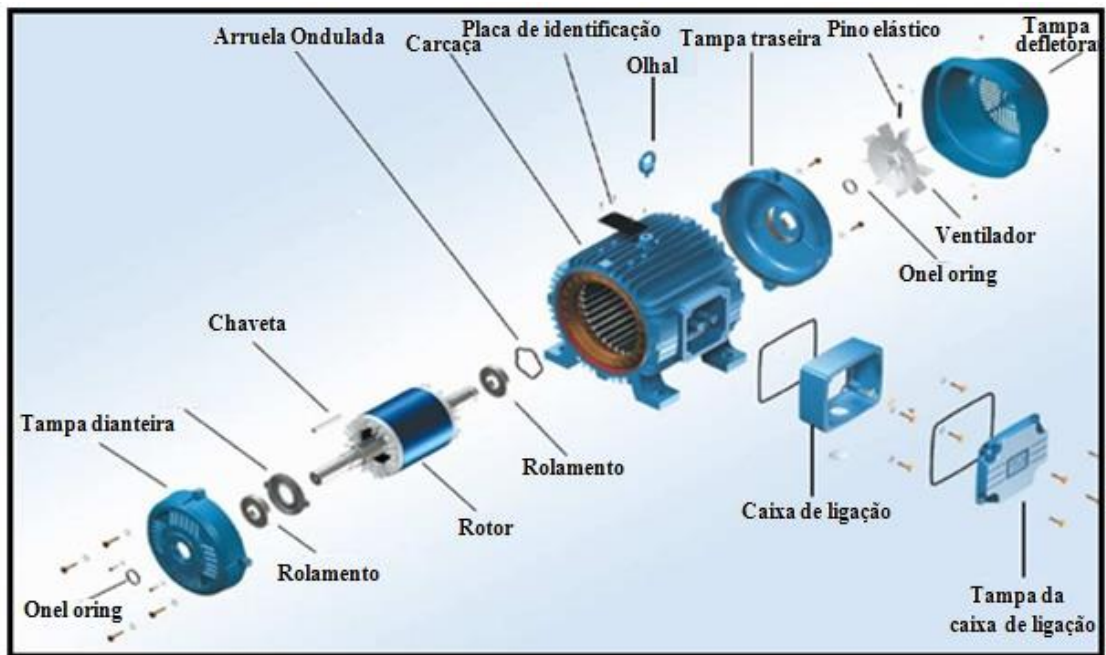


Figura 1.2 - Vista explodida do motor de indução

a) Estator

É a parte imóvel da máquina constituída basicamente por carcaça, parte ativa e caixa de ligação. A Figura 1.3 mostra as partes constituintes do estator.

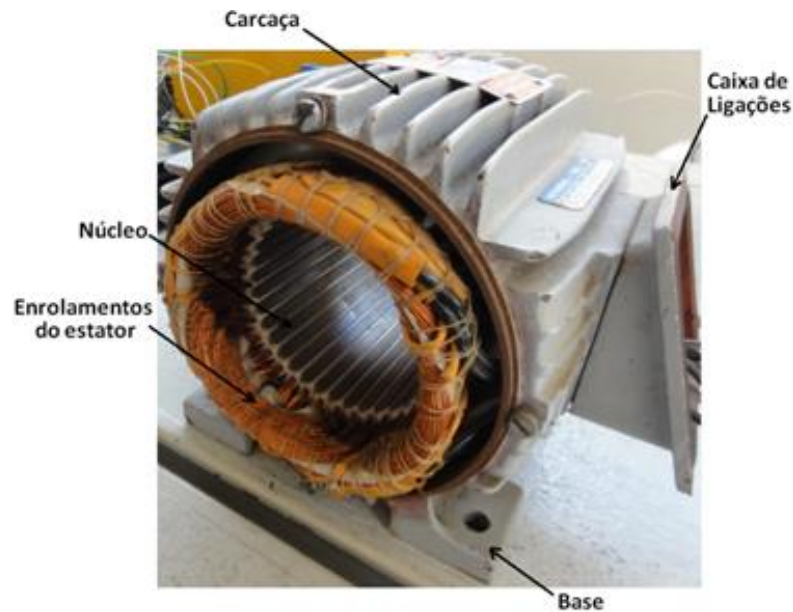


Figura 1.3 – Estator de um motor de indução

- **Carcaça**

É a estrutura que suporta os demais componentes da máquina, contém a base para possibilitar uma fixação rígida além de compor o circuito magnético do motor. Antigamente, era feita de ferro ou aço fundido, hoje é normalmente produzida em aço laminado que possui melhores qualidades magnéticas resultando em menores perdas, melhor resistência mecânica e uniformidade na estrutura.



Figura 1.4 – Carcaça de um motor de indução

- **Parte ativa**

A parte ativa do estator é composta pelo núcleo magnético e pelos enrolamentos, sendo de vital importância para a qualidade da máquina, pois o processo de conversão da energia elétrica em mecânica depende muito de seu estado.

O núcleo é constituído de chapas de material com boas características magnéticas e pequena espessura para diminuir as perdas por Histerese e Foucault e propiciar um caminho adequado para o fluxo magnético. As chapas possuem ranhuras onde os enrolamentos são depositados.

Os enrolamentos são 3 conjuntos de bobinas defasadas geometricamente de 120° entre si. Essas bobinas são conectadas em delta ou estrela para permitir a condução da corrente, e seus condutores são recobertos com vernizes isolantes evitando curtos entre as espiras. O conjunto todo é normalmente isolado do núcleo por um papel isolante e a parte que fica externa ao núcleo é chamada de cabeça de bobina. A Figura 1.5 evidencia o núcleo e os enrolamentos do estator.

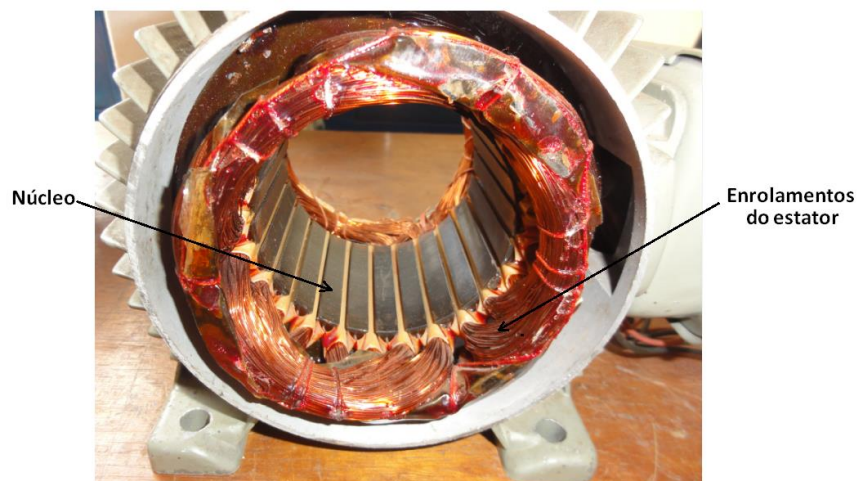


Figura 1.5 – Núcleo e estator de um motor de indução

- **Caixa de ligação**

É composta por uma placa de bornes de material isolante e parafusos.

Os terminais dos enrolamentos são levados até à caixa de ligação onde é feita a conexão desejada com a rede elétrica, sendo que normalmente existem pelo menos duas tensões de alimentação possíveis para o motor, para isso, ficam disponíveis 3, 6, 9 ou 12 terminais na caixa de ligação e a conexão é feita de acordo com a necessidade da aplicação. Os principais tipos de conexão para o motor de indução trifásico são: estrela-triângulo, série-paralela e tripla tensão nominal, sendo que cada uma delas necessita de acessos específicos às bobinas do estator.



Figura 1.6 – Caixa de ligação de um motor de indução

b) Rotor

O rotor é a parte que se movimenta de forma rotativa, constituído basicamente por um núcleo magnético e enrolamentos curto-circuitados que permitem a circulação de correntes e pelo eixo.

- **Enrolamentos e núcleo**

O motor de indução trifásico pode ser do tipo “bobinado” ou “gaiola de esquilo”

No caso do motor tipo “gaiola de esquilo” (que é o mais utilizado) o enrolamento de armadura é constituído por condutores de cobre ou alumínio retilíneos colocados nas ranhuras do núcleo, interligados nas duas extremidades por anéis de curto-circuito (Figura 1.7 b). Já no motor chamado “bobinado” os terminais das fases do enrolamento de armadura são constituídos por fios de cobre esmaltado, semelhantes aos do estator e são ligados a anéis deslizantes, permitindo a inserção de elementos que proporcionam controle de velocidade do motor auxiliando na partida do mesmo (Figura 1.7 a).

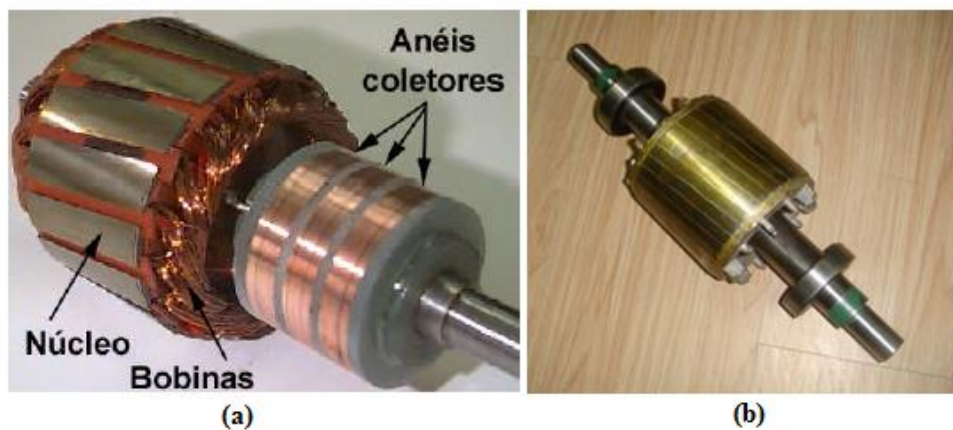


Figura 1.7 – Rotor motor de indução a) bobinado b) gaiola de esquilo

- **Eixo**

É o elemento que acopla o motor à carga e é responsável pela sustentação do enrolamento e do núcleo do rotor.

c) Outras partes constituintes

Outras partes constituintes no motor de indução são:

- i) **Mancais:** elementos mecânicos destinados à fixação do eixo às demais partes da máquina.
- ii) **Sistema de arrefecimento:** ventilação interna, externa, trocadores de calor ou ventilação independente necessários para manter a temperatura do motor em níveis aceitáveis
- iii) **Escovas:** existentes nos motores “bobinados”, fazem o contato elétrico entre o rotor e o circuito externo à máquina
- iv) **Porta-escovas:** existentes nos motores “bobinados”, são necessários para manter as escovas na posição adequada e com uma determinada pressão sobre o comutador.

1.2.2 Modos potenciais de falhas em motores de indução

Apesar do motor de indução trifásico ser considerado robusto a possibilidade de falhas é inerente a qualquer máquina ou processo produtivo.

Em motores de indução podemos dividir as falhas em mecânicas ou elétricas, sendo que a origem dessas falhas pode ser interna, externa ou devido ao ambiente de operação da máquina.

Algumas das falhas de origem elétrica em motores CA são:

- curto entre espiras;
- baixa isolamento;
- barras quebradas do rotor;
- sobrecarga;
- mau contato das conexões da caixa de ligação;
- circulação de corrente pelos mancais.

Já algumas das falhas de origem mecânica em motores CA são:

- rolamentos;
- lubrificação;
- folgas na tampa;
- desalinhamento das tampas;
- eixos empenados ou trincados;
- desbalanceamentos mecânicos;
- base;
- folga da chaveta.

Um estudo publicado pela Associação Brasileira de Manutenção (ABRAMAN) [1] identifica o percentual de falhas para cada um dos principais componentes do motor. A Figura 1.8 ilustra os resultados da pesquisa

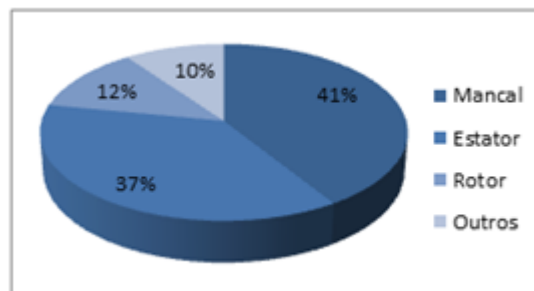


Figura 1.8 - Estatística de Falhas em Motores de Indução Trifásicos.

Observa-se que falhas no mancal e estator representam juntos 78% do total de avarias, se for somado ainda as falhas referentes ao rotor, se obtém 88% do total de falhas em motores de indução dando uma boa visão das partes mais susceptíveis a falhas para essas máquinas.

A seguir serão comentadas as causas principais para os tipos de falhas indicadas na Figura 1.8.

a) Mancal

Falhas no mancal são normalmente de natureza mecânica e representam 41% do todas de falhas em motores de indução, sendo que os mancais de rolamentos são o tipo mais usado em máquinas elétricas.

As causas para falhas em rolamentos são diversas, além do processo normal de falha, as principais causas externas que contribuem para a redução da vida útil do rolamento segundo [6] são:

- i) Contaminação: o processo de contaminação se dá através de pequenas partículas de natureza abrasiva e dureza variável que frequentemente contaminam a lubrificação do enrolamento;
- ii) Corrosão: o processo de corrosão é iniciado pela presença de água, ácido, lubrificação deteriorada, etc. Com o avanço do processo, partículas são expelidas resultando na mesma ação abrasiva da contaminação;
- iii) Lubrificação imprópria: lubrificar em falta ou em excesso faz com que os elementos rolantes não girem corretamente no filme de óleo, causando aquecimento. Esse aquecimento deteriora a graxa, diminuindo a lubrificação e acelerando o processo de falha;
- iv) Problemas na instalação: as falhas originadas por instalação imprópria são causadas porque o rolamento é forçado contra o eixo ou contra a carcaça, resultando em danos físicos ao rolamento. Outros problemas comuns gerados por instalações incorretas são: desalinhamento, deflexão do eixo, empeno da pista interna e externa.
- v) Assimetrias no circuito magnético, por exemplo, excentricidade e distribuições assimétricas da corrente no estator, devido à alimentação desequilibrada, curto entre espiras ou barras quebradas, fazem aparecer tensões induzidas no eixo da máquina ocasionando a circulação de corrente elétrica pelo mancal. Esse fenômeno também é uma causa de falhas no mancal.

Quando essas tensões induzidas no eixo da máquina excedem a tensão de isolamento da película de lubrificante dos enrolamentos surge um arco elétrico que degrada o lubrificante, além de formar crateras ou estrias na superfície dos rolamentos.

b) Estator

Falhas no estator representam 37% do total de falhas em motores elétricos e na maior parte das vezes estão associadas aos enrolamentos e não ao núcleo magnético.

Como pode ser visto na Figura 1.9 as principais falhas no estator são a quebra mecânica e falhas elétricas, totalizando 76% do total.

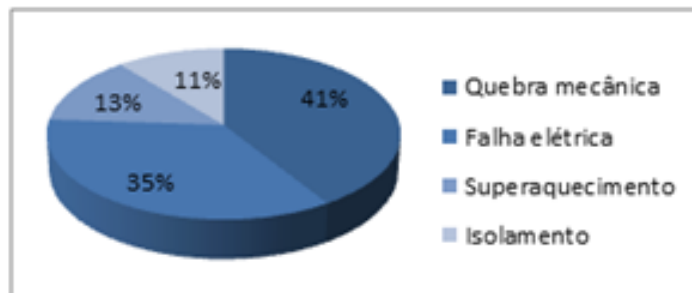


Figura 1.9 - Estatística de Falhas no Estator de Motores de Indução Trifásicos.

Acredita-se que a grande maioria das falhas nos enrolamentos do estator são iniciadas por avarias no isolamento das bobinas de uma das fases, criando curtos entre as espiras cujo isolamento foi afetado. Essa falha faz com que altas correntes circulem pelas espiras curto-circuitadas ocasionando calor excessivo nos enrolamentos. Se a temperatura nas bobinas ultrapassar o valor limite permitido para o motor, o resto do isolamento será comprometido e uma falha completa poderá ocorrer, além disso, como regra geral considera-se que um motor operando a 10 graus acima de seu limite de temperatura terá a vida do isolamento diminuída pela metade [7].

Alguns problemas mecânicos aceleram as avarias no isolamento, como, por exemplo, excentricidade, barras quebradas no rotor, movimento de uma bobina, etc. Essas falhas podem ocasionar o choque entre o rotor e as bobinas do estator e devem ser detectadas ainda em fase inicial para evitar falhas maiores.

Contaminação por materiais estranhos também comprometem o isolamento do estator, a medida que podem causar uma redução na dissipação de calor gerando o mesmo efeito de perda de vida útil do isolamento citado anteriormente.

Independentemente das causas, as falhas do enrolamento do estator podem ser divididas em cinco grupos: curto entre espiras, curto-circuito entre bobinas, curto-circuito entre fases, bobina com ligação a terra e falhas de circuito aberto, como apresentados na Figura 1.10.

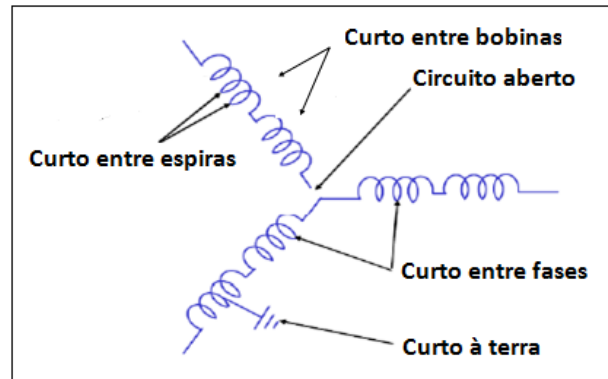


Figura 1.10 - Possíveis modos de ocorrências de falha nos enrolamentos

A fadiga nos enrolamentos do estator pode ser de natureza térmica, elétrica, mecânica ou ambiental, sendo que a rapidez com que a degradação evolui na máquina depende das características nominais e das condições de operação do motor.

Além do envelhecimento natural do material utilizado no isolamento dos enrolamentos e das condições citadas anteriormente, as principais causas das falhas no estator são:

- i) Desbalanço de tensão na alimentação: causa desequilíbrio nas correntes de alimentação da máquina provocando aumento de temperatura no interior do motor, diminuindo a vida útil do isolamento e provocando danos aos enrolamentos;
- ii) Partida direta e operação em sobrecarga: partidas diretas causam correntes elevadas e esforços mecânicos nas bobinas do estator. Correntes elevadas podem comprometer o isolamento dos enrolamentos e esforços mecânicos nas bobinas podem causar fratura nos condutores ou também comprometer o isolamento;
- iii) Sobretensão na alimentação: pode comprometer o isolamento dos enrolamentos;
- iv) Agentes ambientais: contaminação por umidade, óleo, areia etc ou acumulação de poeira, ferrugem e ação corrosiva de produtos químicos podem degradar o estator;
- v) Descargas parciais: acontece quando o isolamento já está em processo de degradação, as descargas parciais aceleram o processo e são consideradas como um indicador da degradação do isolamento;

Na Figura 1.11, pode-se observar vários casos reais de falhas nos enrolamentos do estator de motores de indução.



Figura 1.11 - Falhas nos enrolamentos do estator de um motor de indução [8]

c) Rotor

Falhas no rotor representam 10% do total de falhas em motores elétricos sendo que, como já mencionado, motores de indução podem ter dois tipos de rotor.

- **Rotor tipo gaiola de esquilo**

Pode-se observar pela Figura 1.12 que 35% das falhas em rotores tipo gaiola de esquilo são devidas a barras quebradas, avaria que ocorre principalmente na região dos anéis de curto.

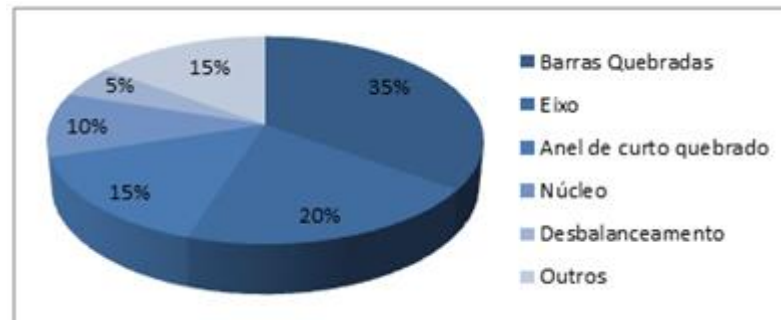


Figura 1.12 - Estatísticas de falhas no rotor de Motores de Indução Trifásicos.

A quebra de uma barra não causa falha imediata do motor, porém, com o aumento da severidade a barra pode se levantar da ranhura e causar roçamento ou danos ao núcleo do estator e aos enrolamentos.

No caso de uma rachadura aparecer em uma barra do rotor, essa barra irá superaquecer e isso pode fazer com que ela se quebre. A assimetria na gaiola do rotor causada pela quebra de uma das barras resulta na distribuição assimétrica das correntes no rotor. Assim, a corrente que circularia pela barra quebrada será distribuída pelas barras adjacentes submetendo-as a maiores tensões térmicas e mecânicas. Com o tempo isso fará com que essas barras sofram rachaduras e venham a quebrar.

As principais causas de quebra de barras são:

- i) Esforços térmicos;
- ii) Esforços mecânicos;
- iii) Cargas pulsantes;
- iv) Imperfeições no processo de manufatura da gaiola;
- v) Unbalanced Magnetic Pull (UMP) no rotor;
- vi) Partidas repetitivas.

A possibilidade de uma fissura na região dos anéis de curto é maior quando o tempo de partida da máquina é longo e quando o acionamento ao qual o motor faz parte requer partidas frequentes.

Na Figura 1.13 pode-se observar alguns casos reais de falhas de barras quebradas em motores de indução.

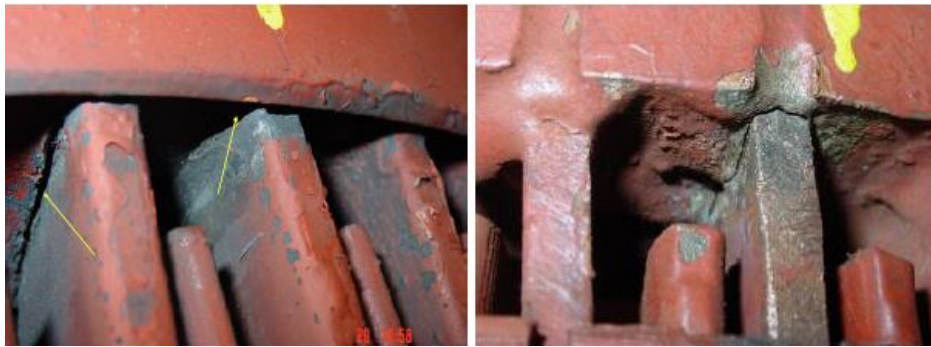


Figura 1.13 - Motor de indução com barras quebradas

- **Rotor bobinado**

Para esses casos os enrolamentos do rotor estão sujeitos a degradação do isolamento da mesma forma que o comentado para as falhas do estator, além dos esforços mecânicos devidos à rotação.

d) Avarias no eixo

Avarias no eixo correspondem a 20% do total dos defeitos no rotor sendo normalmente devidas a esforços mecânicos, que são consideráveis em regime transitório, devidos a fraturas e empenos e são resultado da operação imposta pela carga ou pela alimentação.

e) Entreferro

Segundo [9] uma outra falha mecânica possível é a **excentricidade do entreferro** que resulta de uma não uniformidade no entreferro da máquina e pode ser dividida em excentricidade estática, dinâmica ou mista.

Na excentricidade estática o eixo de rotação do rotor coincide com o seu centro geométrico mas é deslocado do centro geométrico do estator, assim a distribuição do entreferro não é uniforme e varia no tempo. Normalmente é causada por um desbalanceamento ou por um núcleo oval do estator.

Na excentricidade dinâmica o centro geométrico do estator coincide com o eixo de rotação do rotor, mas é deslocado do centro geométrico do rotor, assim a distribuição do air gap não é uniforme em torno do rotor e também varia no tempo. Normalmente é causada por um desbalanceamento do rotor ou da carga, um empeno térmico do rotor ou defeito no rolamento.

Normalmente as excentricidades estática e dinâmica coexistem na máquina, assim deve-se levar em conta a chamada excentricidade mista. Nesse caso o centro do rotor, o centro do estator e o centro de rotação estão deslocados entre si. A Figura 1.14 ilustra a secção transversal de um motor de indução com os diferentes tipos de excentricidades.

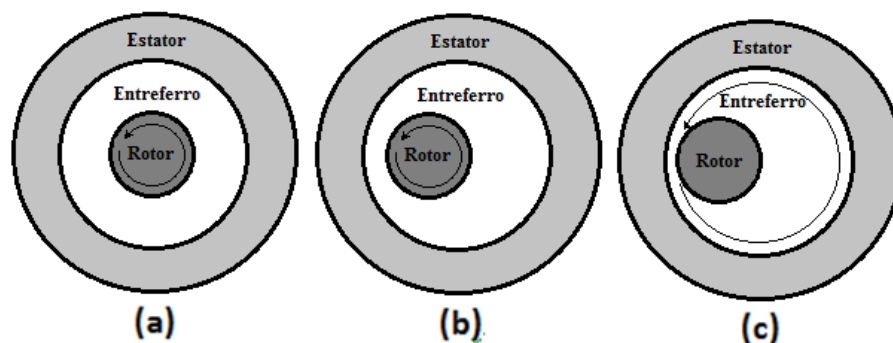


Figura 1.14 - Secção transversal do motor de indução (a) saudável (b) com excentricidade estática (c) com excentricidade dinâmica.

Excentricidade no entreferro de motor de indução ocasiona um desequilíbrio das forças radiais no entreferro (Unbalanced Magnetic Pull – UMP) que gera estresse mecânico sobre o eixo e rolamento. Depois de um tempo de operação isso pode fazer com que o rotor entre em atrito com o estator causando uma falha grave na máquina [10].

As razões que levam a um entreferro desigual podem envolver muitos fatores diferentes. As causas mais comuns de excentricidade são:

- i) Desequilíbrio de tensão;
- ii) Desgaste do rolamento;
- iii) Imperfeições no processo de manufatura,
- iv) Tolerâncias na fabricação e montagem,
- v) Rotor e eixo não concêntricos,
- vi) Núcleo do estator oval
- vii) Empeno térmico do rotor.
- viii) Passagem de corrente elétrica através do mancal;
- ix) Vibrações.

1.3 Manutenção preditiva de motores de indução trifásicos

Devido ao grande uso dos motores de indução trifásicos nas indústrias, já há alguns anos muitas pesquisas são realizadas com o intuito de buscar métodos eficazes para o monitoramento de tais máquinas. Para de evitar falhas e paradas inesperadas nas linhas de produção que dependem desses motores, as pesquisas são direcionadas principalmente a encontrar métodos capazes de diagnosticar falhas em estado inicial de maneira confiável e menos intrusiva possível, sem a necessidade de interferência na produção.

Nesse ponto é importante esclarecer a nomenclatura comum utilizada para as técnicas de monitoramento de máquinas elétricas. Aqui e em qualquer ponto dessa dissertação deve-se entender que quando mencionadas técnicas de medição “on-line” se faz referência aos métodos de coleta de dados realizados com o motor em funcionamento sem a necessidade de interferência na produção, já as técnicas denominadas “off-line” são referentes aos métodos aplicados com o motor parado, sendo necessário, portanto, tirá-lo da linha de produção. Muitas vezes confundem-se os métodos de monitoramento “on-line” como técnicas de medição contínua e/ou remota que são na verdade constituídas normalmente de equipamentos instalados na máquina que coletam, processam e enviam os dados periodicamente aos responsáveis pela análise.

Nos últimos anos com o advento e redução de custo dos microcontroladores e de sensores específicos, surgiram pesquisas voltadas ao monitoramento contínuo e remoto dos motores de indução, técnica essa muito eficaz que sempre é buscada para o acompanhamento de máquinas vitais a produção. Será comentado, na discussão de trabalhos futuros que, apesar do foco desse trabalho ser o desenvolvimento de um equipamento portátil capaz de realizar ensaios on-line, é de interesse e, relativamente simples, a adaptação deste para o monitoramento contínuo dessas máquinas.

Muitos métodos de monitoramento (on-line e off-line) estão hoje disponíveis às indústrias para o acompanhamento da condição de motores de indução, sendo que cada um deles se baseia na aquisição e processamento específico de uma ou mais variáveis coletadas da máquina. As principais grandezas medidas para a realização dessas análises são:

- i) Corrente elétrica;
- ii) Fluxo magnético;
- iii) Vibração;
- iv) Ondas acústicas;
- v) Temperatura;
- vi) Fluidos de refrigeração ou lubrificação.

Para cada uma dessas grandezas medidas, existem técnicas específicas para a extração dos parâmetros relevantes à análise da condição da máquina sendo que as principais se baseiam em:

- i) Análise dos sinais no domínio do tempo;
- ii) Análise dos espectros do sinal;
- iii) Análise wavelet;
- iv) Análise com base em modelos;
- v) Análise estatística.

A seguir serão comentados alguns ensaios para o monitoramento de condição de motores de indução. As técnicas serão separadas em métodos de monitoramento on-line e off-line.

1.3.1 Técnicas de monitoramento Off-Line

Apesar do desconforto gerado pela parada e desacoplamento do equipamento, somado muitas vezes a espera do tempo necessário para que o motor tenha sua temperatura interna uniformizada e para despolarização, alguns ensaios off-line são muito importantes para um diagnóstico eficaz e completo sobre a condição da máquina, assim, alguns deles serão brevemente comentados agora:

- a) **Teste de isolamento:** uma tensão contínua, dependente da tensão nominal de alimentação do motor, é aplicada entre os enrolamentos e o terra, é feita a medição da corrente de fuga e se calcula o valor da resistência de isolamento da máquina. Desse ensaio também são obtidos os índices de absorção dielétrica e índice de polarização da máquina utilizados também para a análise da situação do isolamento do motor.
- b) **Teste de Alto Potencial ou Hi-Pot:** é um teste potencialmente destrutivo e tem como objetivo assegurar que os enrolamentos têm isolamento suficiente para suportar as tensões e sobretensões de trabalho. Normalmente é realizado depois do teste de medição da resistência de isolamento, aplicando-se uma alta tensão contínua (normalmente de 2 vezes a tensão nominal + 1000V, durante 1 minuto) nos enrolamentos com o objetivo de avaliar a condição de isolamento entre eles e o terra.
- c) **Teste de Resistência:** medições das resistências entre fases das bobinas do motor são feitas para se identificar perda de conexões, mau contato ou problemas nos enrolamentos da máquina.
- d) **Análise do circuito do motor (MCA):** técnica que permite o diagnóstico de diversas falhas elétricas no motor através de medições de impedância, indutância, resistência, ângulo de fase, resistência de isolamento, etc. É um método de teste que pode ser realizado no painel elétrico de alimentação ou diretamente no motor, podendo ser aplicado em motores de indução com rotor bobinado ou gaiola de esquilo. Pode também ser aplicada em motores de corrente contínua, motores síncronos e geradores.
- e) **Rotor Influence Test (RIC):** medição das indutâncias entre fases da máquina para diversas posições do rotor em relação ao estator capaz de identificar curto entre espiras do estator, barras rotóricas trincadas e excentricidade.

Além das avarias óbvias, como baixo isolamento ou perda de conexões da máquina, pode-se observar pela Tabela 1.4 um resumo de algumas avarias diagnosticadas por esses métodos tanto no rotor quanto no estator do motor de indução.

Tabela 1.4 – Falhas identificadas pelas técnicas de monitoramento off-line

Estator	<ul style="list-style-type: none"> • contaminação • sobreaquecimento • curto-circuito entre espiras • curto-circuito entre bobinas da mesma fase ou bobinas de fases diferentes • curto-circuito de fase para o terra
Rotor	<ul style="list-style-type: none"> • barras quebradas ou trincadas • excentricidade estática • porosidade

Nas discussões sobre os trabalhos futuros será comentada a possibilidade de se fundir o equipamento responsável pelos ensaios on-line baseados em ESA, que é o foco dessa dissertação, a um equipamento direcionado a ensaios off-line. A soma dessas duas técnicas para o acompanhamento da condição da máquina se demonstra muito eficaz para a detecção de avarias em todas as zonas de falha do motor de indução.

1.3.2 Técnicas de monitoramento On-Line

Algumas técnicas de monitoramento on-line como, por exemplo, análise de vibração e termografia, já estão bem consolidadas no mercado e são executadas em praticamente todas as indústrias que possuem um plano de manutenção preditiva, outras ainda estão em desenvolvimento e muitas pesquisas têm sido feitas na área nos últimos anos para difundi-las. De qualquer maneira, pelas vantagens já citadas anteriormente, essas técnicas tendem a se consolidar cada vez mais no mercado de preditiva, principalmente por não interferirem na produção e pelo barateamento e confiabilidade das mesmas. Uma breve discussão de algumas das principais técnicas de monitoramento on-line de condição será feita a seguir.

a) Análise de vibração

O acompanhamento e análise de vibração é uma das técnicas mais antigas de manutenção preditiva na indústria e sua maior aplicação se dá em máquinas rotativas como bombas, compressores, ventiladores etc.

Um sistema baseado em análise de vibração é capaz de detectar vários tipos de falhas, entre elas: desbalanceamento, desalinhamento, empenamento de eixos, excentricidade, desgaste em engrenagens e mancais, má fixação da máquina ou de componentes internos, folgas, desgastes em rolamentos e outros componentes rotativos etc.

Segundo [11] o conceito básico da técnica consiste na análise de sistemas rotacionais, medindo sua vibração e comparando com espectros de valores pré-estabelecidos, onde é possível avaliar rolamentos e seus componentes periféricos.

A Figura 1.15 demonstra um exemplo de um espectro de vibração:

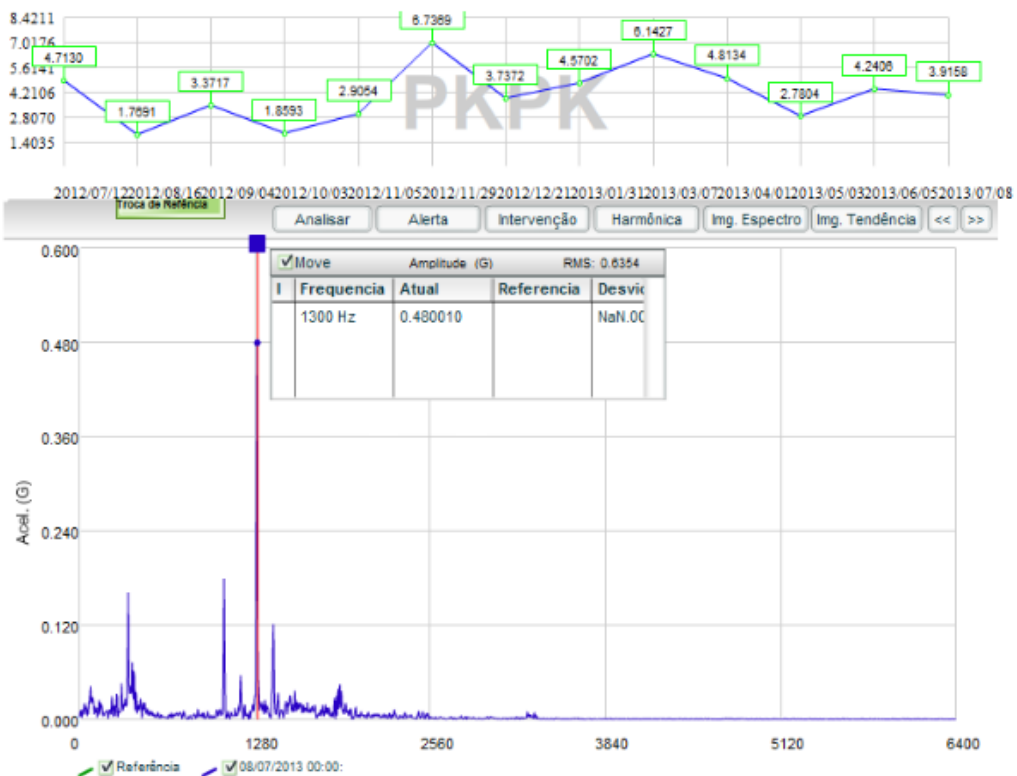


Figura 1.15 - Exemplo de espectro de vibração

b) Termografia

Segundo [12] a análise termográfica é a técnica que, através de equipamentos específicos, torna possível medir a temperatura das superfícies de qualquer objeto existente em nosso universo. Isto é possível devido ao fato de que todo corpo, acima do zero absoluto, emite radiação. Em outras palavras, a termografia é a técnica onde podemos ver e medir temperaturas superficiais dos objetos fazendo assim uma comparação das diferenças entre as temperaturas para as mais diversas finalidades.

A partir de uma imagem térmica e da análise das temperaturas, é possível identificar falhas que não são possíveis visualizar através do olho humano, sendo que a técnica de termografia é então usada em qualquer circuito eletrônico, quadros de distribuição de energia, estações, subestações, instalações elétricas, motores, pontes rolantes etc.

As figuras 1.16 e 1.17 mostram imagens referentes à técnica de Termografia Elétrica e Mecânica, respectivamente.

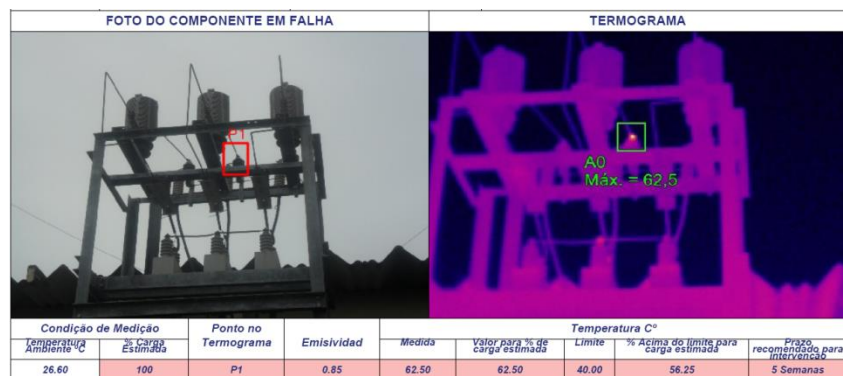


Figura 1.16 - Exemplo de termografia elétrica

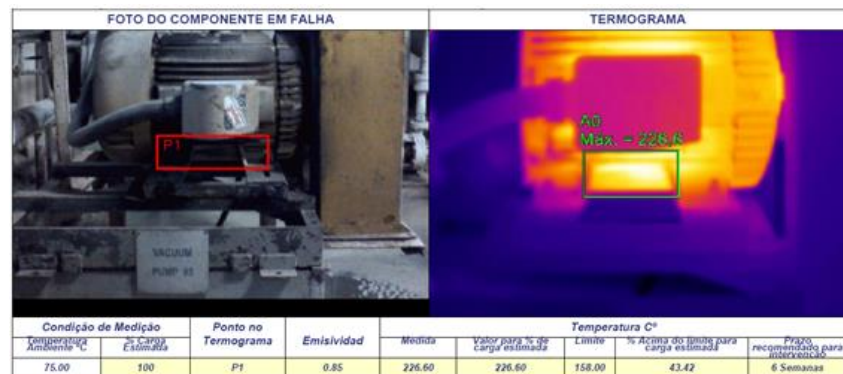


Figura 1.17 - Exemplo de termografia mecânica

A técnica é normalmente utilizada para detecção de mau contato em conectores e demais falhas elétricas, além de apresentar boa capacidade de identificação de falhas mecânicas e de fadiga de materiais.

c) **Análise acústica:**

Essa técnica consiste na avaliação de sinais acústicos para detectar problemas elétricos e mecânicos na máquina. Esses sinais são ondas mecânicas de natureza transitória que se propagam através do meio isolante e da estrutura interna do equipamento até atingir a superfície externa da máquina. Normalmente, a fonte dessa emissão são mecanismos de deformação e fratura como, por exemplo, o surgimento de trincas, movimento de discordâncias, maclação, fraturas etc [13].

Além de falhas elétricas como descargas parciais e arcos elétricos, podem também ser identificados problemas mecânicos como afrouxamento de parafusos, vibração, folgas etc.

A Figura 1.18 mostra uma imagem referente à técnica de análise acústica.



Figura 1.18 - Exemplo de análise acústica

d) Análise da Assinatura Elétrica (ESA)

É uma das técnicas de monitoramento on-line mais recente, consiste na aquisição dos sinais de tensão e corrente elétrica do motor utilizando do mesmo como transdutor para detectar a presença de avarias e monitorar sua condição. É uma técnica não invasiva e que pode monitorar motores instalados em áreas de difícil acesso, através dos painéis de alimentação, sem a necessidade do acesso propriamente dito a máquina, garantindo assim, agilidade e segurança ao método.

Entre todas as técnicas analisadas é uma das únicas que tem a característica de ser on-line e poder ser aplicada remotamente. Graças a essas vantagens, nos últimos anos várias pesquisas foram realizadas para o desenvolvimento de técnicas de coleta, processamento e análise de dados voltados a esse método e o equipamento desenvolvido nessa tese é, devido a essas vantagens, baseado nessa aplicação.

A chamada **MCSA (Motor Current Signature Analysis)** é uma parte da técnica da Análise da Assinatura Elétrica que se baseia apenas no sinal de corrente do motor, sendo assim, uma técnica de aplicação mais simples já que os sinais de tensão de alimentação da máquina não são utilizados. Segundo [14] MCSA é uma técnica de diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos não invasiva, que consiste na análise do espectro de corrente do estator para detecção de avarias. Isso é possível, pois quando uma falha esta em desenvolvimento o espectro de frequências da corrente do estator sofre mudanças em relação ao espectro de corrente de um motor saudável e através da comparação entre esses dois espectros é possível avaliar se uma falha esta em desenvolvimento e em qual parte da máquina ela deve ocorrer.

A técnica é de simples aplicação, pois da mesma forma que em ESA utiliza o motor como transdutor e permite a avaliação dos parâmetros elétricos da máquina através do painel de alimentação da mesma, não sendo necessária sua parada nem acesso a seus terminais.

A Figura 1.19 mostra o fluxograma de análise das técnicas de ESA e MCSA:

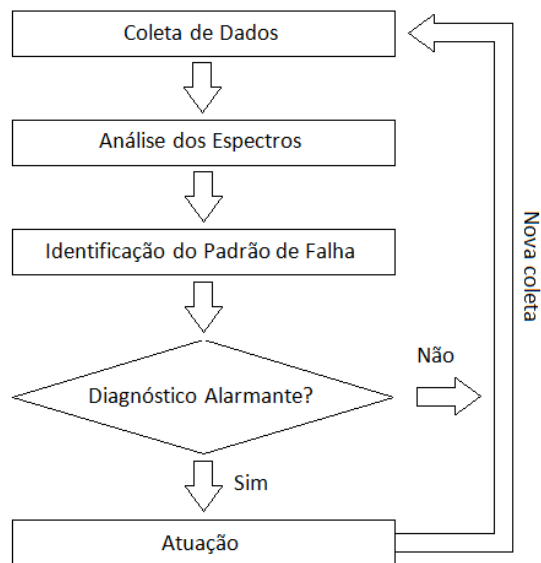


Figura 1.19 - Fluxograma das técnicas de ESA e MCSA

Em [6] pode ser visto um estudo comparativo entre diferentes técnicas de diagnóstico, tanto on-line quanto off-line, para a detecção de avarias nas diversas zonas de falhas de motores de indução e a Tabela 1.5 mostra um resumo dos resultados.

Tabela 1.5 – Comparativo entre as técnicas de monitoramento

Sensibilidade: ● Alta ● Baixa	Qualidade de Energia	Drive de Controle	Inversor de Frequência (VFD)	Conectores	Cabos	Estator	Rotor	Isolamento	Entreferro (Air Gap)	Alinhamento	Rolamentos	Vibração	Carga Acoplada
	<i>Técnicas off-line</i>												
Teste de Alto Potencial								●					
Teste de Isolamento								●					
Teste de Resistência				●		●							
MCA		●		●	●	●	●	●	●				
<i>Técnicas on-line</i>													
Vibração						●	●		●	●	●	●	●
Termografia	●	●		●	●	●				●	●		●
Análise Acústica		●				●					●		●
Medidas Elétricas	●	●		●		●	●						
ESA	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●

Pode-se observar que os melhores resultados são obtidos quando se aplicam duas ou mais técnicas em conjunto sendo que as combinações mais utilizadas são:

- i) Vibração e termografia: não consegue detectar algumas avarias no estágio inicial mesmo assim é considerada uma solução abrangente.
- ii) MCA e ESA: podem detectar qualquer tipo de falha, mas tem como desvantagem a necessidade de desconexão da máquina para os ensaios de MCA.
- iii) Vibração, termografia e ESA: combina tecnologias de monitoramento mecânicas e elétricas, sendo assim, a mais efetiva e moderna técnica de análise.

2. Análise da Assinatura Elétrica (ESA)

O foco desse trabalho, pelas características citadas no capítulo anterior, é o desenvolvimento de um equipamento portátil capaz de realizar ensaios preditivos baseados nas técnicas de ESA em motores de indução trifásicos gaiola de esquilo, para isso, faz-se necessário um estudo mais profundo sobre a técnica. Nesse capítulo faremos uma breve análise histórica e um estudo sobre algumas das principais falhas detectadas pela técnica.

2.1 Definição de ESA

Através da leitura das tensões e correntes do motor, ESA é uma técnica capaz de diagnosticar avarias no circuito de alimentação, no motor, na carga e na transmissão, além de fornecer informações à respeito do desempenho da máquina:

- i) *Circuito de alimentação*: fornece informações sobre a qualidade de energia como sobrecorrente, sobtensão, desbalanço de correntes e de tensões, distorção total harmônica (THD), fator de crista (CF), potências ativas, reativas, aparentes e fator de potência, harmônicos pares, ímpares, positivos, negativos e nulos para tensão e corrente etc. Com esses valores é possível monitorar a condição de operação da máquina.
- ii) *Motor*:
 - Falhas no rotor: barras ou anéis de curto trincados ou quebrados; juntas com alta resistência etc.
 - Falhas no estator: defeitos elétricos ou mecânicos como curto entre espiras
 - Falhas no entreferro: excentricidade estática, dinâmica ou mista
 - Desalinhamento e desbalanceamento
 - Problemas nos rolamentos: pista interna, pista externa, gaiola e esferas.
- iii) *Carga e transmissão*: polias, correias, caixas de engrenagens, rolamentos, etc.

Na aplicação das técnicas que compõem ESA, o motor é utilizado como um transdutor e as leituras das tensões e correntes são obtidas através de sensores instalados no próprio painel de

alimentação da máquina garantindo grande facilidade na realização dos ensaios em máquinas com acesso restrito.

Os sinais oriundos desses sensores são aquisitados, filtrados e processados e os resultados obtidos são então utilizados para a detecção de falhas através de análises das assinaturas da corrente elétrica e suas respectivas tendências de evolução no tempo.

2.2 Revisão Histórica

Diagnóstico de falhas e acompanhamento da condição de operação de motores de indução via os sinais de tensão e corrente elétrica se demonstram muito interessantes devido à facilidade do monitoramento dessas grandezas, principalmente nos últimos anos depois do desenvolvimento dos microprocessadores e de sensores específicos para aquisição desses sinais. Surgiram então muitas pesquisas voltadas a aquisição, condicionamento e processamento dos sinais elétricos para o diagnóstico de avarias, principalmente no que diz respeito aos motores de indução e hoje em dia já existem inúmeras técnicas de processamento e análise dessas grandezas.

Os estudos relacionados às grandezas elétricas começaram com a observação de que variações na corrente medida por um amperímetro instalado na alimentação de um motor tinham relação com assimetrias em seu rotor, porém, como variações de carga também causam esse efeito foi necessário o desenvolvimento de métodos mais precisos que contassem com uma inteligência maior no processamento e filtragem dos sinais para o monitoramento dessas máquinas. Em [6] pode ser encontrado uma análise histórica de pesquisas relacionadas à Análise da Assinatura Elétrica onde se comenta brevemente sobre alguns autores que trabalharam em métodos para a detecção de falhas em motores de indução. Aqui também será feita uma revisão histórica comentando alguns dos inúmeros trabalhos já publicados na área.

No início dos anos 80, muitos autores como Hargis et al. [15], Deleroi [16], Williamson e Smith [17], Lowther e Silvester [18], Elkasabgy et al. [19], Kliman [20] entre outros, estudaram a aplicação da análise espectral da corrente na detecção de falhas de barras quebradas ou trincadas em motores de indução trifásicos bobinado e gaiola de esquilo, mais

tarde a pesquisa de Thomson e Stewart [21] demonstrou que a técnica era também capaz de detectar tais avarias em motores alimentados por inversores de frequência e algum tempo depois foi estendida para a detecção de outros padrões de falhas.

Ainda nos meados dos anos 80, Notelet e Ravalitera [22] demonstraram que excentricidades no rotor da máquina criam variações na indutância mútua nos enrolamentos do estator fazendo com que a corrente estatórica também sofra variações que se caracterizam por componentes espectrais obtidas a partir do número de par de polos e de barras rotóricas, conforme Cameron, et al [23]. Entre outros que também estudaram os efeitos das excentricidades em motores de indução já nos anos 90 estão Dorrell et al. [24], Thomson e Barbour [25], Cardoso e Saraiva [26].

Na mesma época Thomson, et al. [27] verificou que desequilíbrios acentuados na alimentação da máquina ou curto-circuito de uma bobina geram alterações significativas no espectro de corrente do motor, principalmente com relação ao terceiro harmônico.

Com relação a avarias em rolamentos, Schoen, et al. [28] apresentou resultados que mostram que é possível a detecção de falhas em estágios mais avançados através das mesmas frequências características de rolamentos utilizadas em análise de vibração desde que adotada uma resolução espectral suficiente. Mais recentemente Obaid, Habetler e Stack [29] apresentaram resultados experimentais para diversos tipos de avarias na pista interna de rolamentos.

Já nos anos 90 Maier [30] propõe o uso da análise da potência instantânea para a detecção de falhas no motor. Esta abordagem é aplicável para falhas cujo efeito causa oscilações no torque, já que a potência instantânea é mais sensível a mudança de fase entre a corrente do estator e a tensão de alimentação [31,32].

Cardoso [33] usa o Vetor de Park para detecção de problemas no rotor, estator e desequilíbrios elétricos. Yazici, B. e Kliman e Silva, J. L. H. e Cardoso usam a mesma abordagem para detectar defeitos em rolamentos [34,35].

Já nos anos 2000 Benbouzid [36] fez uma descrição completa das principais técnicas de ESA para a detecção de avarias em motores de indução e Obaid, et al. [37] e Bonaldi [38]

mostraram a aplicabilidade da técnica na detecção de falhas mecânicas na carga acoplada e no sistema de transmissão.

Muitas outras pesquisas mais recentes também foram publicadas, em 2007 Mehala et al. [39] discute os fundamentos da MCSA e demonstra através de estudos de casos reais, como a análise da assinatura da corrente do motor pode diagnosticar de forma confiável problemas em motores de indução gaiola de esquilo e Vinoth e Suresh Kumar [40] estudaram a detecção de avarias nos enrolamentos de máquinas através de MCSA comprovando a eficácia da técnica na detecção de curto nos enrolamentos das bobinas do estator.

Foram mostrados apenas alguns dos inúmeros trabalhos relacionados, muitos outros podem ser encontrados demonstrando a eficácia das técnicas de monitoramento e previsão de falhas em motores de indução através da análise da corrente estatórica.

2.3 Efeito das falhas nas correntes do estator

Após a breve revisão histórica de pesquisas relacionadas com ESA vamos agora mostrar alguns dos principais padrões de falhas para avarias em motores elétricos. Normalmente esses padrões de falhas foram observados primeiramente através de experimentação e mais tarde foram comprovados por modelos matemáticos.

Os padrões relacionados com falhas mecânicas do conjunto dependem diretamente do escorregamento (s) e conseqüentemente da velocidade rotórica (f_r), como essas variáveis são dependentes da carga aplicada ao motor às técnicas de ESA necessitam que os ensaios sejam feitos com um valor de carga mínimo e constante.

As equações 2.1, 2.2 e 2.3 evidenciam a relação entre o escorregamento e a velocidade do rotor:

$$s = \frac{v - f_r}{v} \quad (2.1)$$

$$v = \frac{2 \cdot f}{p} \quad (2.2)$$

$$f_r = \frac{f \cdot (1-s)}{p/2} \quad (2.3)$$

Onde:

v : velocidade síncrona

f : frequência de alimentação [Hz]

p : número de polos do motor

s : escorregamento em p.u.

f_r : frequência do rotor [Hz]

Outras falhas que não serão discutidas aqui também podem ser detectadas utilizando o método adequado de aquisição e análise de dados, apenas algumas das principais serão comentadas, mostrando a eficácia do método através de resultados experimentais e práticos obtidos em estudos anteriores relacionados ao tema.

A validação do ou dos métodos utilizados pelo equipamento foco desse trabalho será feita experimentalmente sendo que a eficácia na detecção do instrumento desenvolvido será comprovada através dos ensaios realizados em laboratório.

2.3.1 Barras Quebradas

A detecção da maioria das falhas em motores de indução através das técnicas de ESA se dá através da análise do espectro de frequência da corrente do estator, onde a avaria é identificada pela análise de frequências características para a falha estudada. Essas frequências características de falhas são obtidas através de algumas características construtivas da máquina e ao observar a magnitude destas, juntamente com dados históricos é possível se diagnosticar ou não uma falha no motor.

A falha de barras quebras, por exemplo, causa uma perturbação específica no fluxo magnético da máquina fazendo com que a frequência do rotor flutue e conseqüentemente a rotação e a

corrente do estator também sofram variações, permitindo que a avaria seja identificada através da análise dos espectros obtidos.

A Figura 2.1 mostra um exemplo da variação do fluxo magnético, medido por um sensor de fluxo cuja saída é em tensão, no interior do motor elétrico devido a essa falha:

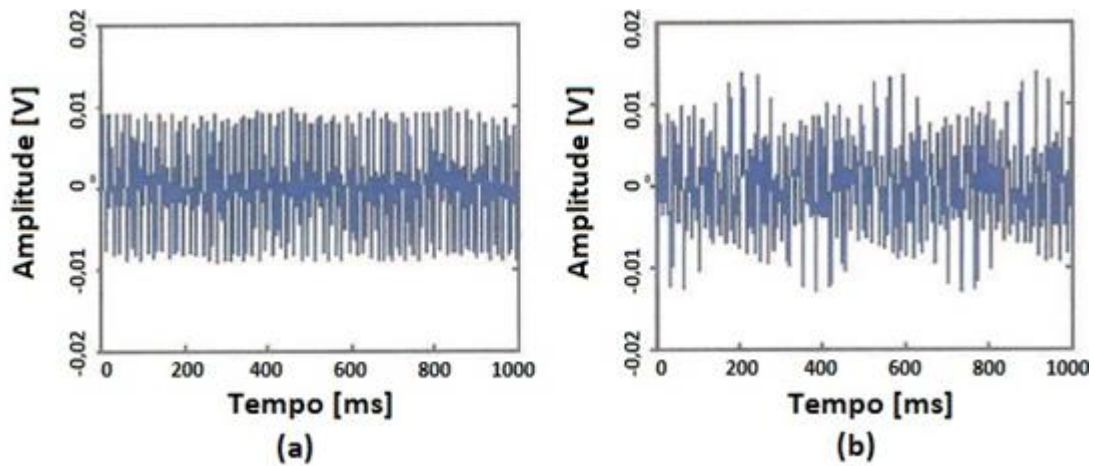


Figura 2.1 - Exemplo do fluxo magnético em um motor a) saudável b) com falha de barra quebrada

Almeida em [3] mostra que o campo magnético do entreferro pode ser expresso pela equação 2.4

$$B = B_m \cdot \text{sen}(2\pi \cdot R_s \cdot f_r \cdot t + Q_s) \cdot [1 + \text{sen}(2 \cdot f_i \cdot t + \theta)] \quad (2.4)$$

Onde:

B = campo magnético

R_s = número de ranhuras do rotor

f_r = frequência de rotação do rotor [Hz]

f_i = frequência de linha [Hz]

Q_s e θ = ângulos de fase

O termo $2\pi \cdot R_s f_r$ [rad/s] é a frequência de passagem das ranhuras e o termo $1 + \text{sen}(2 \cdot f_i \cdot t + \theta)$ é o elemento modulado.

A rotação da máquina em função da flutuação do torque pode ser expressa segundo a equação 2.5

$$f_r = f_1 + k \cdot \cos[2\pi \cdot (2s \cdot f_1) \cdot t + \theta_r] \quad (2.5)$$

Onde:

$s \cdot f_1$ = frequência de escorregamento

k = número inteiro

θ_r = ângulo da fase

Como pode ser observado, a frequência do rotor varia com duas vezes a frequência de escorregamento e seu valor médio é a frequência de alimentação. Assim, a análise da presença de falha é feita se observando as bandas laterais espaçadas de duas vezes a frequência de escorregamento em torno da frequência de alimentação da rede, sendo que o espectro utilizado para a análise é plotado com as frequências em Hz e as amplitudes em dB devido às grandes diferenças de magnitude entre a frequência de alimentação e as frequências características de falha.

Assim, a frequência característica de falha é dada pela equação:

$$fc = (1 \pm 2 \cdot k \cdot s) \cdot f_1 \quad (2.6)$$

Onde fc é a frequência característica de falha, s é o escorregamento, f_1 é a frequência da rede e $k = 1, 2, 3, \dots$

Quanto maior for a diferença (em dB) entre a amplitude da frequência das bandas laterais e a frequência de alimentação da máquina, maior será o número de barras quebradas e a avaria será mais grave. Essa relação de maior magnitude das frequências características de falha = mais gravidade da avaria será observada em todos os modos potenciais de falhas, o que é mais

uma das vantagens das técnicas de ESA, pois permite quantificar a avaria se a análise for realizada baseada em um bom banco de dados e curvas de tendências.

O estudo de barras quebradas em motores de indução foi uma das primeiras avarias analisadas historicamente, assim a assinatura para essa falha específica já é muito conhecida e existe uma carta de severidade para ajudar a classificar a condição do rotor de acordo com a amplitude do primeiro harmônico da direita.

Tabela 2.1 – Tabela referência para análise de barras quebradas

Grau de Severidade	Diferença [dB]	Condição Rotórica	Ação Recomendada
1	>60	Excelente	Nenhuma
2	54-60	Boa	Nenhuma
3	48-54	Moderada	Acompanhar tendência
4	42-48	Possibilidade de pontos de alta resistência ou barra quebrada	Estado de atenção
5	36-42	1 ou 2 barras quebradas	Estado de emergência
6	30-36	Múltiplas barras trincadas ou quebradas	Reparo
7	<30	Múltiplas barras e/ou anel de curto trincadas ou quebradas	Reparo

É bom ter em mente que devido a condições de operação, instalação e fabricação do motor muitas vezes essa carta pode não representar a condição real do rotor e é sempre mais confiável o acompanhamento periódico da máquina. Por exemplo, já foi comentado anteriormente que a condição de carga da máquina influencia no diagnóstico para as técnicas de ESA, e essa variável não é levada em consideração quando se utilizado apenas a tabela 2.1, assim, um motor operando a meia carga com 1 barra quebrada terá magnitudes das frequências características diferentes de um mesmo motor operando a carga total com a mesma condição de falha. Essas situações serão observadas claramente mais adiante na demonstração de algumas pesquisas já realizadas.

Encontram-se inúmeros exemplos na literatura de detecções de barras quebradas e avarias no anel de curto para motores de indução trifásicos através de técnicas de ESA. Alguns exemplos serão brevemente demonstrados a seguir:

Em [41] tem-se medições para os casos de 2, 3, 5 e 7 barras quebradas no rotor. Pode-se observar facilmente o aumento da diferença entre as frequências citadas para o aumento do número de barras quebradas pela Figura 2.2.

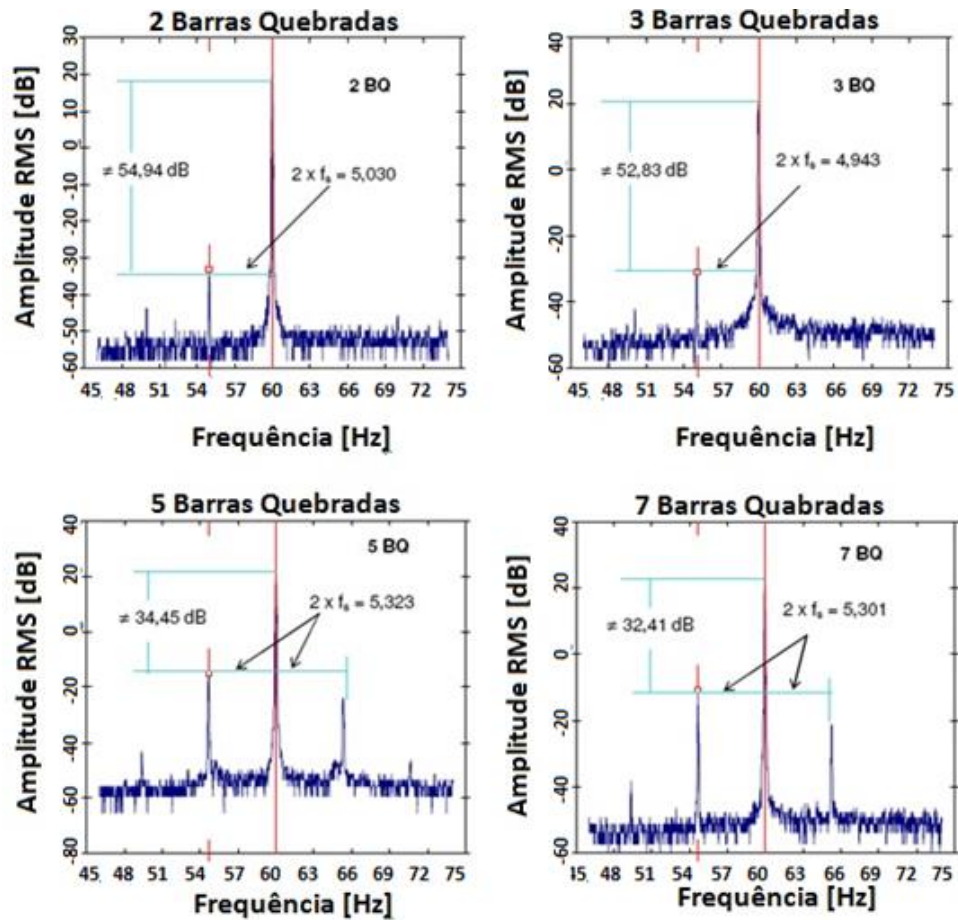


Figura 2.2 - Espectro de corrente para 2, 3, 5 e 7 barras quebradas

A Tabela 2.2 resume os resultados e evidencia a capacidade de se quantificar a avaria através das diferenças entre as magnitudes das frequências medidas.

Tabela 2.2 – Diferença entre as amplitudes das frequências medidas

Número de barras quebradas	Diferença entre as amplitudes das frequências [dB]
2	54,94
3	53,83
5	34,45
7	32,41

No mesmo estudo é possível ver uma equação que estima o número de barras quebradas do rotor através da amplitude da frequência de banda lateral e de características construtivas do motor.

$$N = \frac{4 \cdot NR}{10^c + p} \quad (2.7)$$

$$C = \frac{V_{abs}(A - B)}{20} = \frac{\delta}{20} \quad (2.8)$$

Onde:

N = número de barras quebradas

NR = número de ranhuras do rotor,

p = número de polos do motor

A = amplitude em “dB” na frequência de rede

B = amplitude em “dB” na frequência da banda lateral

A Figura 2.3 representa as variáveis da equação:

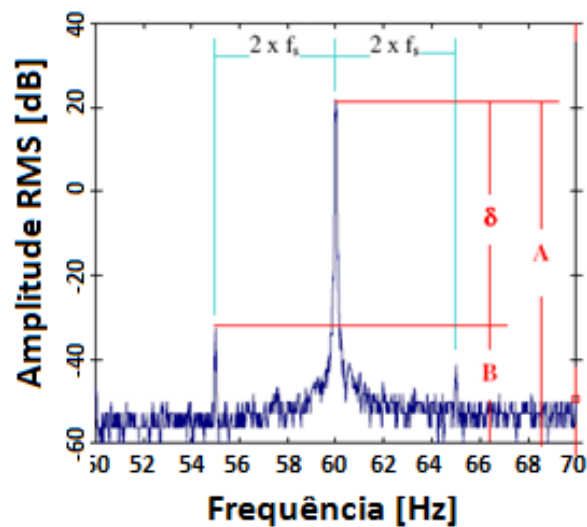


Figura 2.3 - Cálculo estimado do número de barras quebradas no rotor

Em [7] pode ser visto um estudo comparativo entre diferentes técnicas para a detecção de barras quebradas em motores com várias condições de cargas. As técnicas utilizadas no estudo comparativo foram Transformada Rápida de Fourier, Transformada de Wavelet e FFT baseado no espectro de potência.

As figuras a seguir são os espectros obtidos para as diversas condições de carga utilizando a transformada rápida de Fourier.

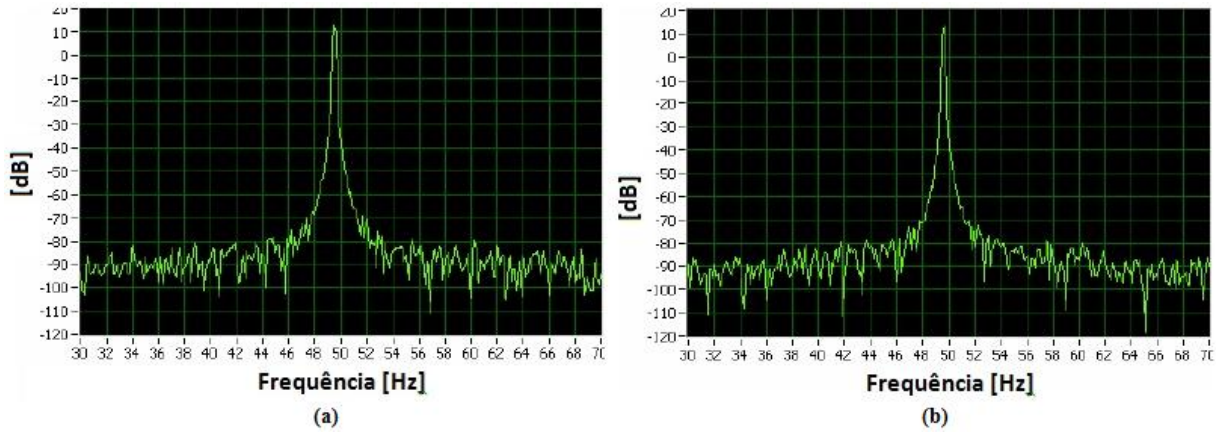


Figura 2.4 - Espectro de potência de um motor sem carga (a) saudável (b) com 1 barra quebrada

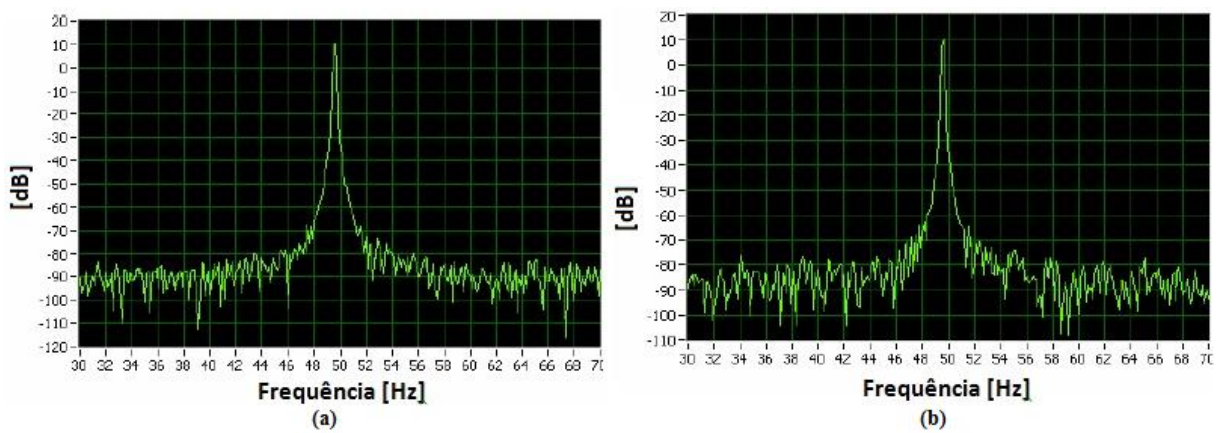


Figura 2.5 - Espectro de potência de um motor sem carga com (a) 5 barras quebradas (b) 12 barras quebradas

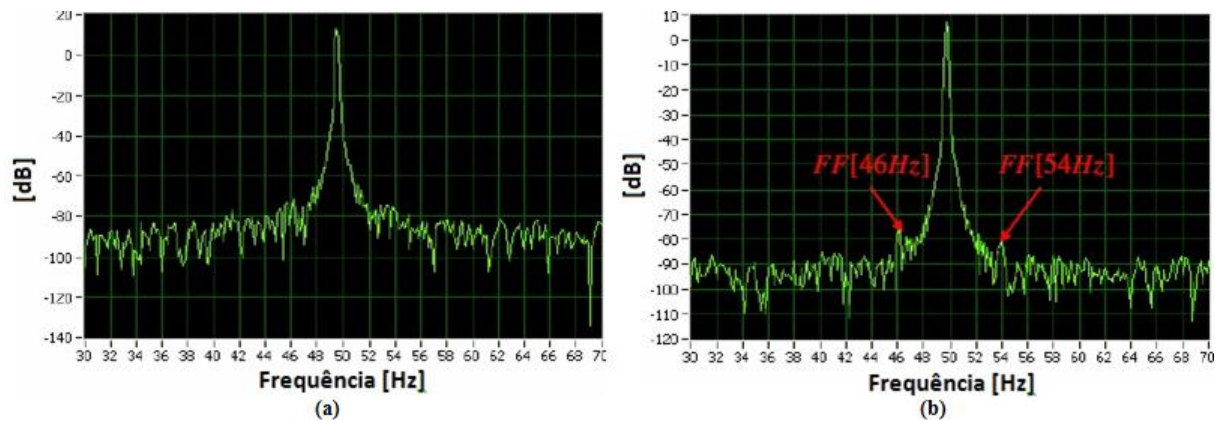


Figura 2.6 - Espectro de potência de um motor com meia carga (a) saudável (b) com 1 barra quebrada

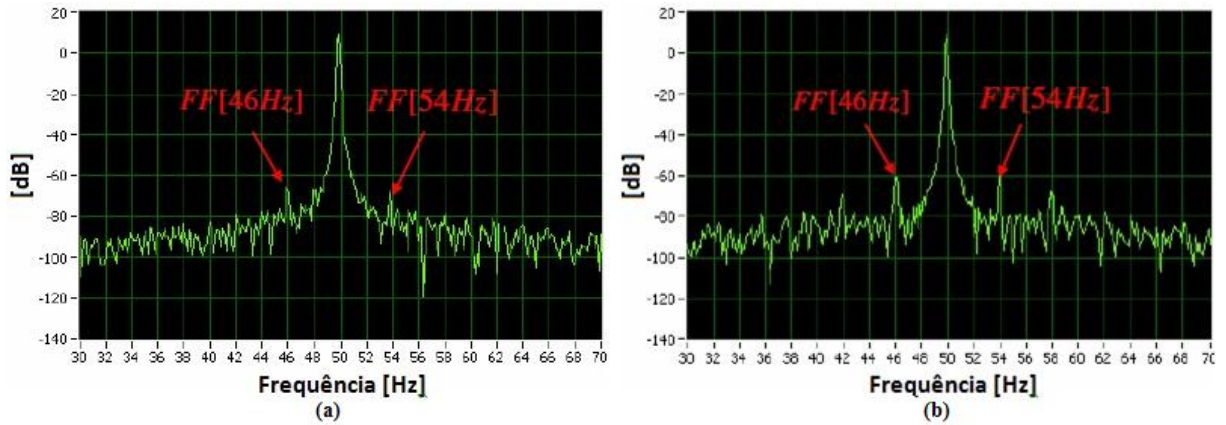


Figura 2.7 - Espectro de potência de um motor com meia carga com (a) 5 barras quebradas (b) 12 barras quebradas

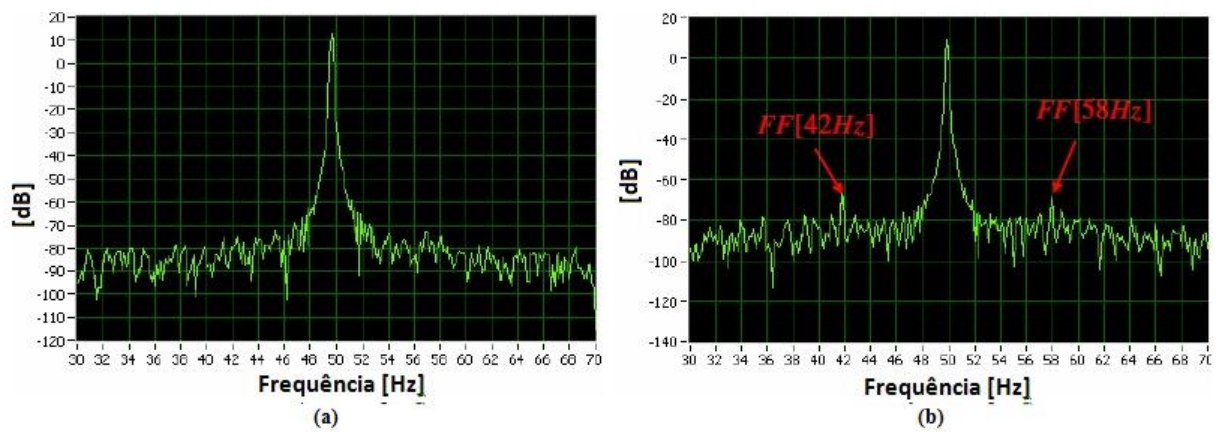


Figura 2.8 - Espectro de potência de um motor com carga total (a) saudável (b) com 1 barra quebrada

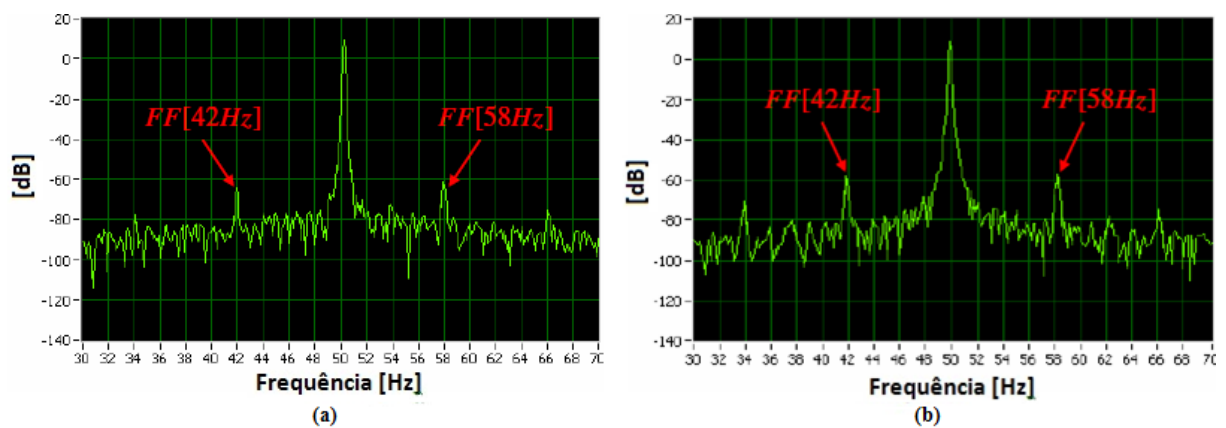


Figura 2.9 - Espectro de potência de um motor com carga total com (a) 5 barras quebradas (b) 12 barras quebradas

A Tabela 2.3 mostra o resumo da análise para as falhas de 1,5 e 12 barras quebradas encontradas no estudo.

Tabela 2.3 – Resumo dos resultados

Figura	Condição de operação	Número de barras quebradas	Observação
2.4 (b)	Sem carga	1	Frequência de falha não visível
2.5 (a)	Sem carga	5	Frequência de falha não visível
2.5 (b)	Sem carga	12	Frequência de falha não visível
2.6 (b)	Meia carga	1	Frequência de falha visível
2.7 (a)	Meia carga	5	Frequência de falha visível
2.7 (b)	Meia carga	12	Frequência de falha visível
2.8 (b)	Carga total	1	Frequência de falha visível
2.9 (a)	Carga total	5	Frequência de falha visível
2.9 (b)	Carga total	12	Frequência de falha visível

Algumas conclusões obtidas pela pesquisa foram:

- Para um pequeno número de barras quebradas a avaria no rotor pode ser detectada quando o motor opera com carga total, já na condição sem carga isso torna-se difícil.
- Quanto maior a carga e número de barras quebradas, mais facilmente as frequências características de falhas são observadas.

Em [42] é indicado um método simples para a detecção de problemas no rotor que faz uso da velocidade real do motor medida ou estimada via equações que usam as características nominais da máquina e os valores de corrente medidos através de sensores específicos. A velocidade do motor é então utilizada para se identificar as bandas laterais da frequência de alimentação através da frequência de passagem de polos da mesma forma que nos estudos anteriores. A Figura 2.10 mostra espectros para o motor saudável e com a falha de barras quebradas.

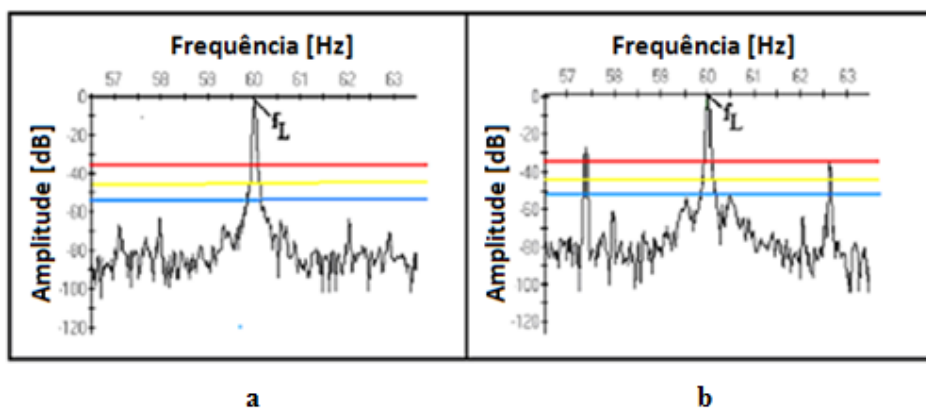


Figura 2.10 - Espectro de potência de motor a) saudável b) com barras quebradas

Para a confirmação da avaria no rotor deve-se então observar o chamado “Efeito Redemoinho” que aparece no espectro de corrente abaixo da 5ª harmônica da frequência de alimentação através de três picos uniformemente espaçados pela frequência de passagem de polos. Para essas componentes não existe uma indicação de amplitude crítica, apenas a sua visualização já comprova a avaria no rotor. O efeito redemoinho pode ser observado na Figura 2.11.

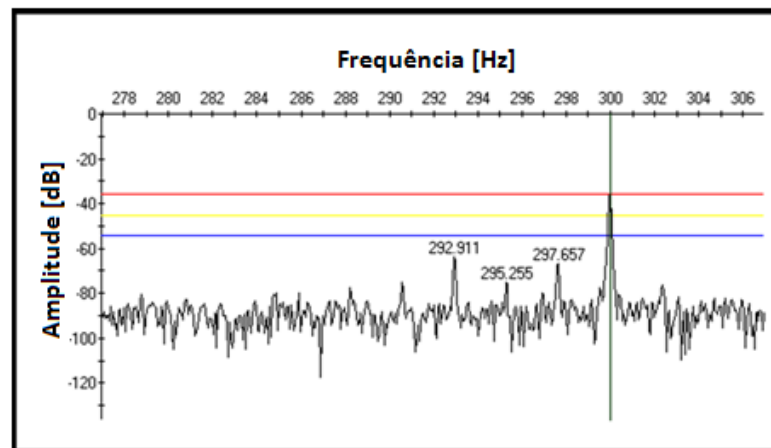


Figura 2.11 - Efeito redemoinho

Ainda na mesma referência é indicado um método para se analisar ou confirmar as avarias no rotor através de medições das correntes durante a partida do motor, no chamado teste In Rush, utilizando da característica de que falhas no rotor causam alterações no perfil do gráfico das correntes de partida da máquina, além de mudanças na amplitude da corrente e na duração da partida. Nas Figuras 2.12 e 2.13 pode ser observado o teste de partida para dois motores idênticos, um apresentando barras quebradas e o outro em perfeito estado.

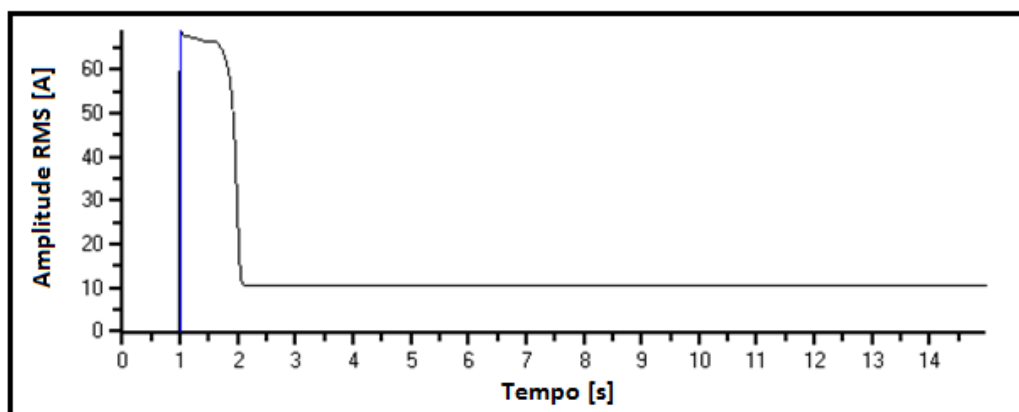


Figura 2.12 - Teste de partida para motor saudável

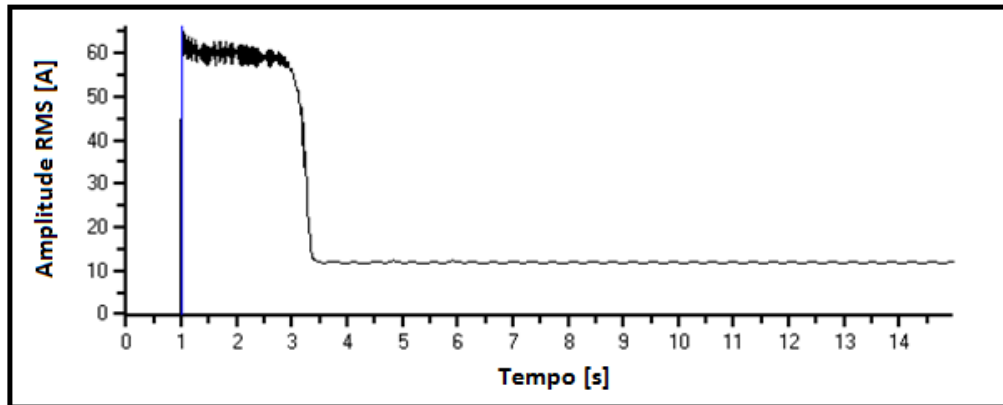


Figura 2.13 - Teste de partida para motor com barras quebradas

Facilmente é observado um “chaveamento” no pico do gráfico devido às barras quebradas além do aumento do tempo de partida.

Vale lembrar que alterações na carga aplicada ao motor causam variações no gráfico de partida da máquina mudando, por exemplo, o tempo de partida e a corrente máxima atingida, dificultando assim sua comparação com ensaios realizados com diferentes situações de cargas.

2.3.2 Excentricidade no entreferro

Como já foi discutido, a excentricidade no entreferro da máquina se caracteriza por uma não uniformidade no air gap do motor podendo ser estática, dinâmica ou mista. Quando isso acontece o desequilíbrio das forças radiais no entreferro (Unbalanced Magnetic Pull – UMP) podem causar a fricção do estator com o rotor, o que resulta em sérios danos em ambos.

Segundo [7] a excentricidade pode ser caracterizada pelas frequências de ranhuras dadas por:

$$fc = \{[(n_n \cdot R \pm n_d) \cdot (1-s) / p] \pm n_{ws}\} \cdot f_1 \quad (2.9)$$

Onde:

f_c = frequência característica de falha para excentricidade [Hz]

n_n = inteiro 0, 1, 2, 3...

R = número de barras do rotor

n_d = ordem da excentricidade, é um inteiro 0, 1, 2, 3...

$n_d = 0$ para excentricidade estática

$n_d = 1, 2, 3...$ para excentricidade dinâmica

s = escorregamento

p = número de par de polos

$n_{ws} = 1, 3, 5...$

f_1 = frequência de alimentação [Hz]

Existem três n 's na equação, portanto, três conjuntos harmônicos: n_n relacionado com o rotor, n_{ws} relacionado com o estator e n_d relacionado com a excentricidade. Para variações de excentricidade estática $n_d = 0$ e para variações da excentricidade dinâmicas $n_d = 1, 2, 3...$

Para a avaliação de excentricidade estática se compara a diferença em dB entre a maior amplitude dos harmônicos monitorados e a amplitude da frequência de alimentação, já para a avaliação da excentricidade dinâmica, se compara a diferença em dB da amplitude da componente de excentricidade dinâmica com a amplitude da componente da excentricidade estática que ela modula.

Esse método de detecção tem como desvantagem a necessidade de se conhecer aspectos construtivos da máquina, porém, utilizando essa região do espectro de frequências para o monitoramento do motor é possível se distinguir os efeitos relacionados à excentricidade estática e dinâmica.

Pode ser visto nesse mesmo trabalho um estudo para a detecção de diferentes níveis de excentricidade em motores com diferentes condições de cargas utilizando deste método. A técnica utilizada no estudo comparativo foi a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

O estudo realizou medições para um motor com 25% e 50% de excentricidade estática e com excentricidade mista, operando nas condições de carga máxima e sem carga. Os resultados obtidos podem ser observados nas figuras a seguir:

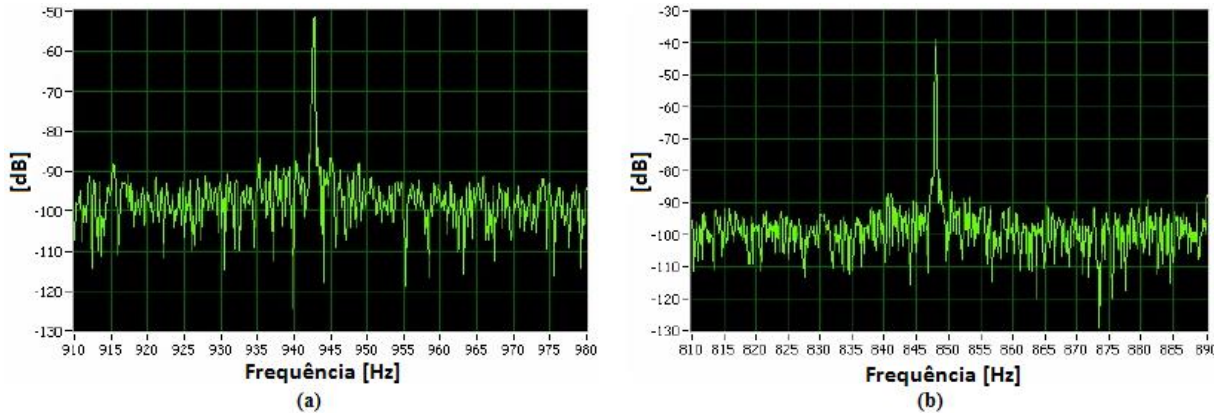


Figura 2.14 - Espectro de potência de um motor saudável (a) sem carga (b) com carga

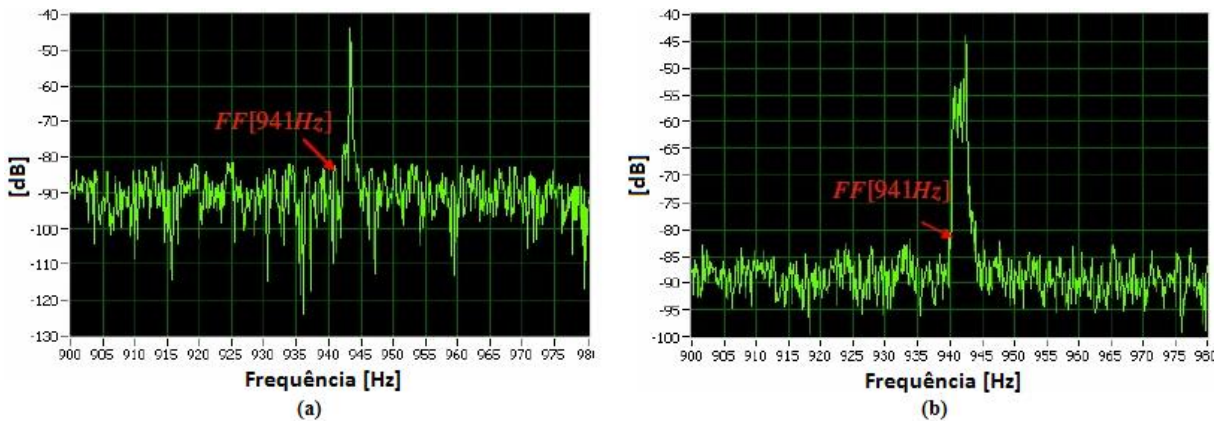


Figura 2.15 - Espectro de potência de motor sem carga com (a) 25% (b) 50% de excentricidade estática

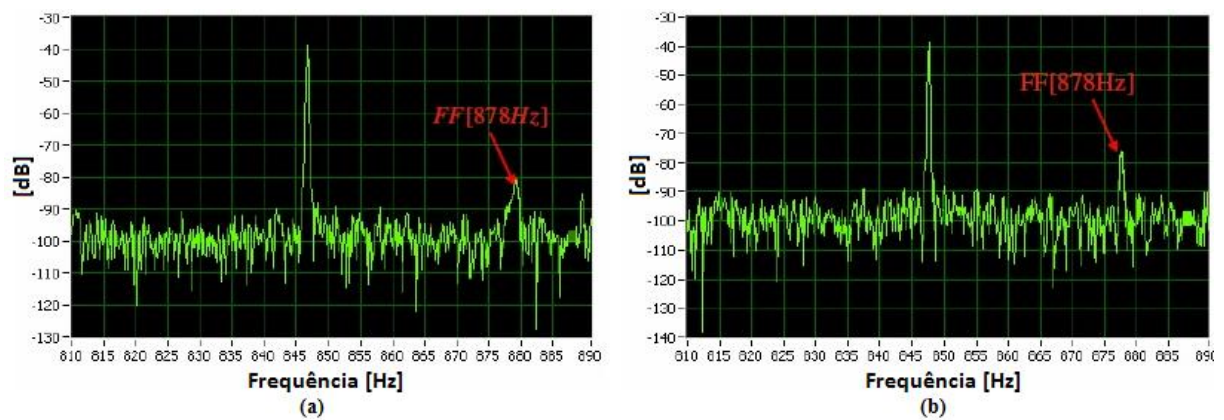


Figura 2.16 - Espectro de potência de motor com carga total com (a) 25% (b) 50% de excentricidade estática

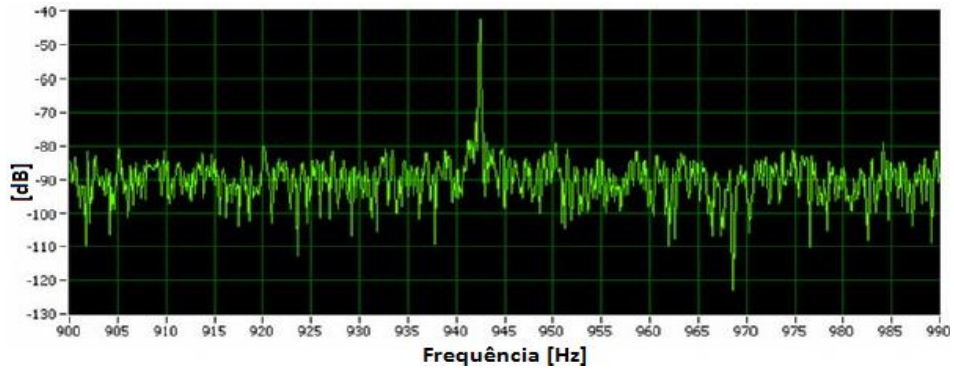


Figura 2.17 - Espectro de potência de um motor saudável e sem carga

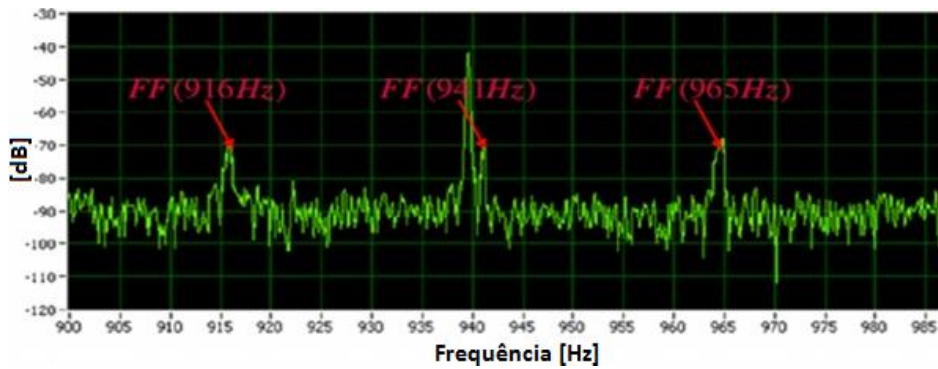


Figura 2.18 - Espectro de potência de motor com excentricidade mista sem carga

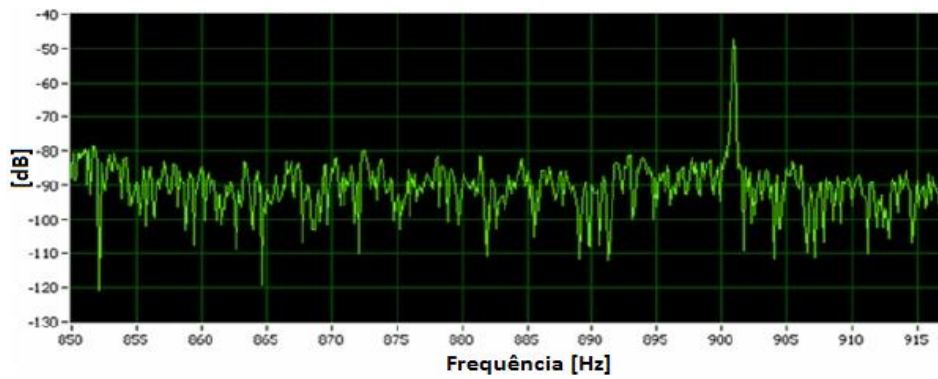


Figura 2.19 - Espectro de potência de um motor saudável com carga total

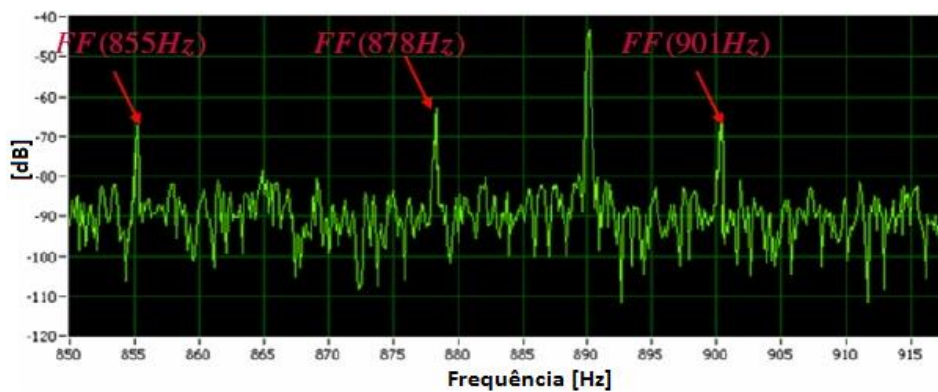


Figura 2.20 - Espectro de potência de um motor com excentricidade mista com carga total

Pode-se observar a eficácia da técnica para o monitoramento de máquinas operando com carga, já para o caso de ensaios realizados sem carga a amplitude da frequência característica da falha é muito pequena, o que dificulta a análise para a determinação da avaria. Observa-se também que, como no caso de falhas de barra quebrada, a magnitude das frequências características de falha aumenta com a gravidade da avaria possibilitando ao analista avaliar não só a presença da falha, mas também a condição em que esta se apresenta.

A Tabela 2.4 mostra o resumo da análise dos espectros da potência para 25% e 50% de falha de excentricidade estática encontradas no estudo.

Tabela 2.4 – Resumo dos resultados para excentricidade estática

Figura	Condição de operação	Tipo de Excentricidade	Escorregamento	Frequência de falha (calculada e observada experimentalmente)	Magnitude [dB]	Observações
2.15 (a)	Sem carga	25% de excentricidade estática	0,01	941 Hz	-82	Frequência de falha não visível
2.16 (a)	Carga Total	25% de excentricidade estática	0,08	878 Hz	-80	Frequência de falha visível
2.15 (b)	Sem carga	50% de excentricidade estática	0,01	941 Hz	-	Magnitude não pode ser medida
2.16 (b)	Carga Total	50% de excentricidade estática	0,08	878 Hz	-75	Frequência de falha visível

A Tabela 2.5 mostra o resumo da análise dos espectros de potência do motor de indução com excentricidade mista.

Tabela 2.5 – Resumo dos resultados para excentricidade mista

Figura	Escorregamento	Condição	Frequência de falha [Hz]				Observações
			a	b	b	c	
2.18	0,01	Sem carga	916	941	68	69	Magnitude aumenta com o aumento da carga
2.20	0,08	Carga Total	855	878	63	66	

Segundo [42] a avaliação de excentricidade pode ser feita de maneira simples analisando a amplitude das bandas laterais ao redor do ponto específico do espectro de frequências chamado de Frequência de Excentricidade (Fexc), calculado segundo a Equação 2.10:

$$F_{exc} = \frac{B \cdot RPM}{F_1} \quad (2.10)$$

Onde:

F_{exc} = frequência de excentricidade

B = número de barras do rotor

RPM = rotação do motor

F_1 = frequência de alimentação

As bandas laterais que devem ser analisadas são determinadas pela frequência de alimentação do motor, sendo que se a avaria piorar as 1ª e 3ª harmônicas da frequência de alimentação vão se desenvolver ao redor de F_{exc} . Assim, por exemplo, em um sistema alimentado em 60 Hz, aparecerão bandas laterais de +- 60 Hz e +-180 Hz ao redor de F_{exc} .

A Figura 2.21 mostra o espectro de frequência utilizando essa técnica.

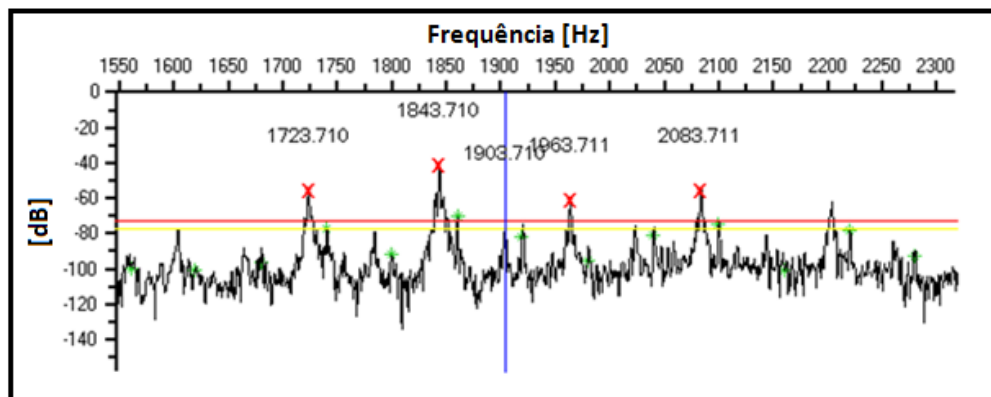


Figura 2.21 - Espectro de potência de um motor com excentricidade

Esse é um motor que possui 34 barras rodando a 3359,49 RPM. A frequência de excentricidade calculada é 1903,71 Hz e está marcada pelo cursor. Podem-se observar claramente as bandas laterais marcadas no gráfico indicando a excentricidade da máquina em 1903,71 +- 60 Hz e 1903,71 +- 180 Hz.

Esse método depende do conhecimento do número de barras e da velocidade de rotação do motor, porém, esses valores quando não indicados podem ser estimados matematicamente fazendo com que o método seja de fácil aplicação e confiável. Além disso, a velocidade da máquina pode ser medida com o auxílio de um sensor apropriado comum no meio industrial.

Levando em consideração as velocidades típicas e as características construtivas dos motores de indução, pode-se dizer que o padrão de falhas aparece no espectro de frequência entre 600 e 2500 Hz.

Outro método para detecção de falhas nas partes que giram do motor discutido em [6] se baseia na **rotação do eixo**. Esse método indica a presença de desalinhamento, desbalanceamento, problemas no rolamento e na carga que refletem na excentricidade da máquina.

Para a detecção da avaria nesse método deve-se acompanhar a componente da frequência de rotação do motor modulando a fundamental, como em ESA o padrão é uma modulação nessa mesma frequência fundamental, a componente a ser observada aparece como bandas laterais como as dadas a seguir:

$$f_{ecc} = f \cdot [1 \pm k \cdot (1-s) / (p/2)] \quad (2.11)$$

Onde:

f = frequência de alimentação [Hz]

k = ordem do harmônico (1,2,3...)

s = escorregamento

p = número de polos do motor

Diferente da técnica anterior, aqui não é necessário se conhecer qualquer aspecto construtivo do motor para obter o padrão.

2.3.3 Defeitos nos rolamentos

As pesquisas voltadas a detecção de falhas em rolamentos através de análise de vibração são anteriores às técnicas voltadas à análise da corrente estatórica, mesmo assim, hoje já são vários os estudos publicados que utilizam ESA no diagnóstico de avarias em rolamentos.

Os defeitos em rolamentos podem ser agrupados em duas categorias segundo [29]: defeitos localizados, que são os concentrados em uma pequena região do rolamento e defeitos distribuídos, que são os espalhados em todo ele.

Diferentes falhas podem ocorrer nos elementos do rolamento, sendo as principais:

- i) Defeito da pista externa
- ii) Defeito da pista interna
- iii) Defeito no elemento girante

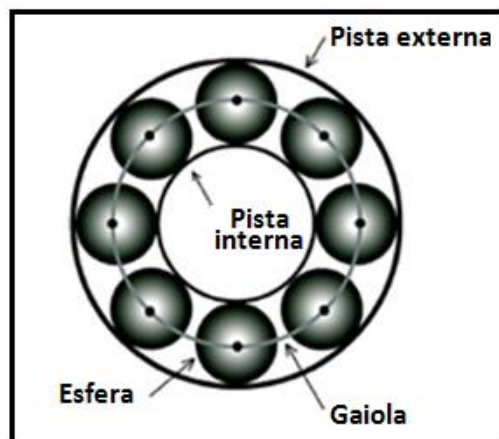


Figura 2.22 - Rolamento de esfera

Em geral, vibrações ou deslocamentos absolutos não afetam a corrente estatórica de um motor, porém, como já comentado, deslocamentos relativos entre o rotor e o estator (excentricidades) se refletem na corrente. Uma vez que os rolamentos apoiam o rotor da máquina, qualquer defeito nesses componentes vai causar um movimento radial entre o rotor e estator e assim a avaria pode ser identificada pelo espectro de corrente através de suas frequências características [6,28].

Assim devido às excentricidades, as vibrações geram correntes do estator em frequências características estudadas por [36,43,44,45].

O padrão de defeitos em rolamentos pode ser determinado pela equação 2.12:

$$f_b = f \pm k \cdot f_c \quad (2.12)$$

Onde:

f = frequência de alimentação [Hz]

k = ordem do harmônico e igual 1,2,3, ...

f_c = frequência característica do rolamento [Hz]

f_b = frequência característica de falha [Hz]

De acordo com [7], para pista externa:

$$f = (N_b / 2) \cdot f_r \left(1 \pm \frac{D_b}{D_c} \cos \beta\right) \quad (2.13)$$

Onde:

N_b = número de esferas

f_r = velocidade do rotor [Hz]

D_b = diâmetro da esfera

D_c = passo do rolamento

β = ângulo de contato das esferas nas pistas.

Pode-se notar pelas equações que para se determinar as frequências características de falhas necessita-se de informações construtivas do rolamento, entretanto, existem algumas aproximações que auxiliam nesse trabalho.

Ainda em [7] pode ser visto um estudo para a detecção de diferentes níveis de falhas de rolamento em motores com diferentes condições de cargas utilizando esse método. A técnica utilizada no estudo comparativo que será demonstrada aqui foi a FFT, mas também foram

testados no estudo os métodos de Distribuição Wigner-Ville – WVD e Vetor de Park para a detecção da mesma avaria.

O estudo realizou medições utilizando 6 rolamentos: 2 rolamentos bons e quatro rolamentos perfurados sendo que dois rolamentos foram perfurados na pista externa com furos de 2 e 4 mm de diâmetro, enquanto os outros dois rolamentos foram perfurados na pista interna com furos de mesmos diâmetros. Os resultados obtidos podem ser vistos nos espectros a seguir:

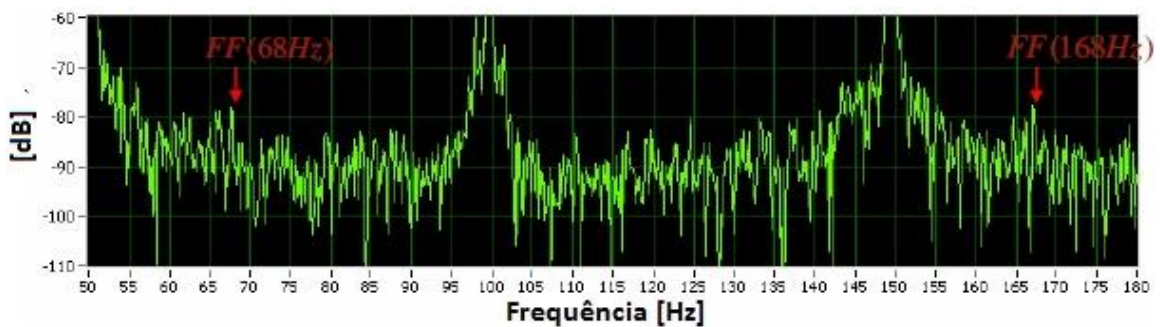


Figura 2.23 - Espectro de potência de motor com furo de 2mm na pista interna do rolamento sem carga

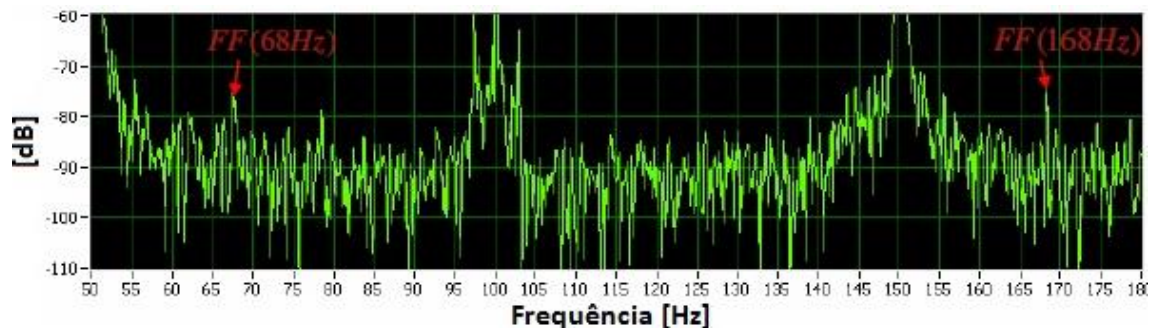


Figura 2.24 - Espectro de potência de motor com furo de 4mm na pista interna do rolamento sem carga

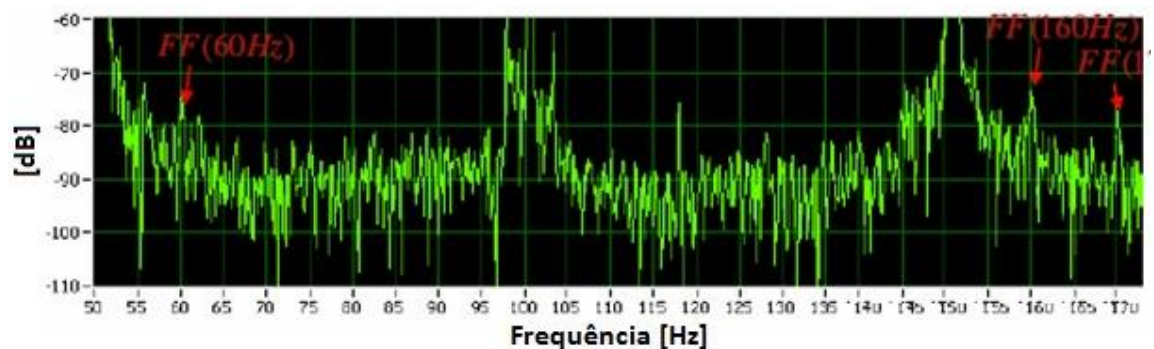


Figura 2.25 - Espectro de potência de motor com furo de 2mm na pista interna do rolamento com carga total

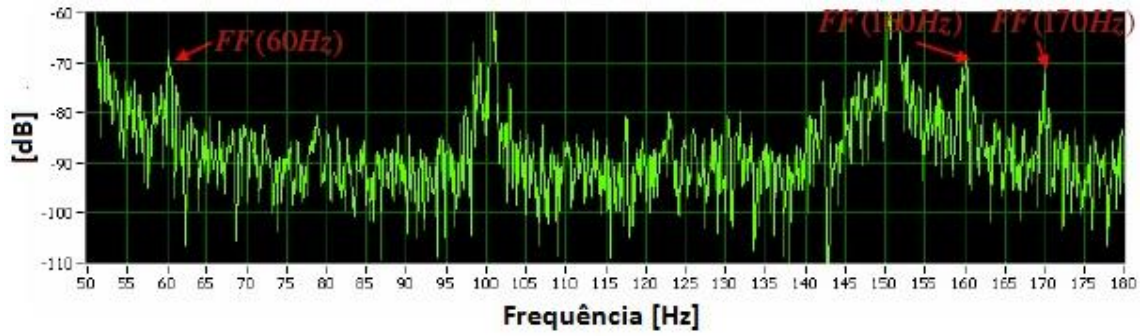


Figura 2.26 - Espectro de potência de motor com furo de 4mm na pista interna do rolamento com carga total

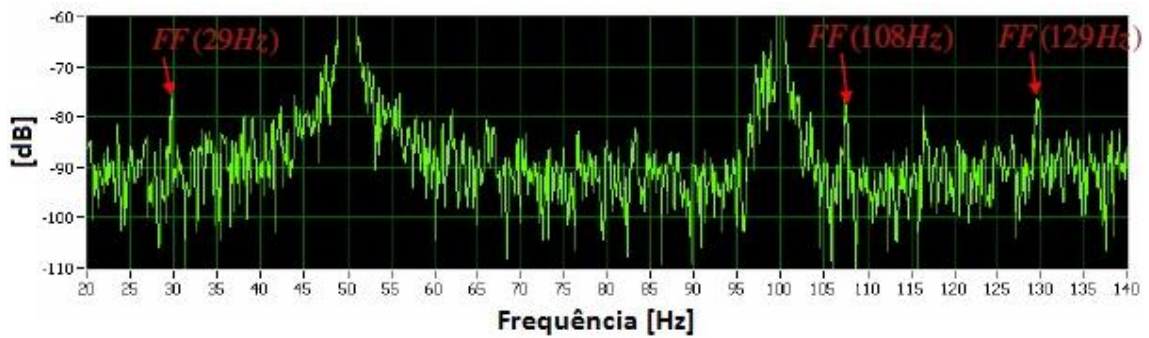


Figura 2.27 - Espectro de potência de motor com furo de 2mm na pista externa do rolamento sem carga

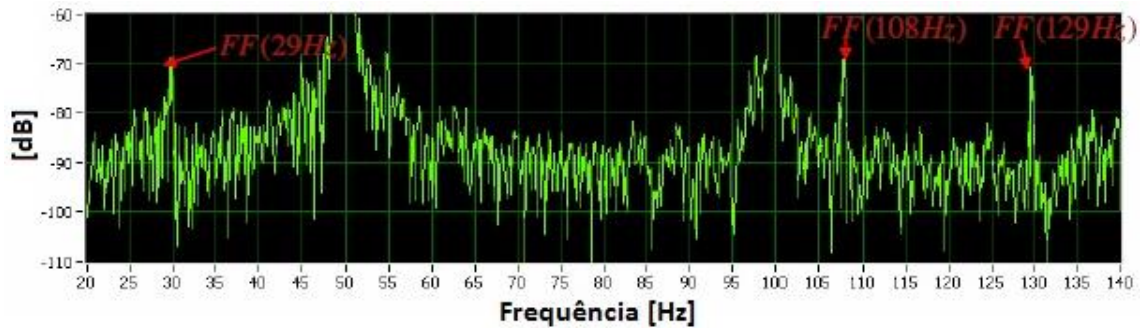


Figura 2.28 - Espectro de potência de motor com furo de 4mm na pista externa do rolamento sem carga

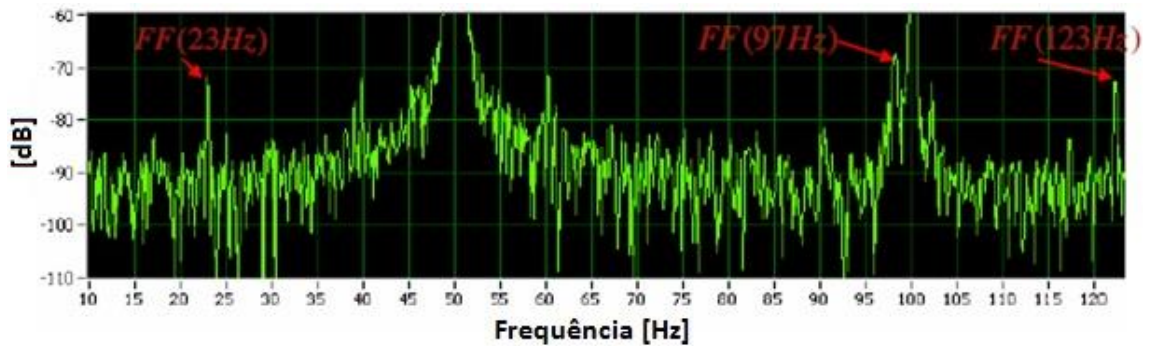


Figura 2.29 - Espectro de potência de motor com furo de 2mm na pista externa do rolamento com carga total

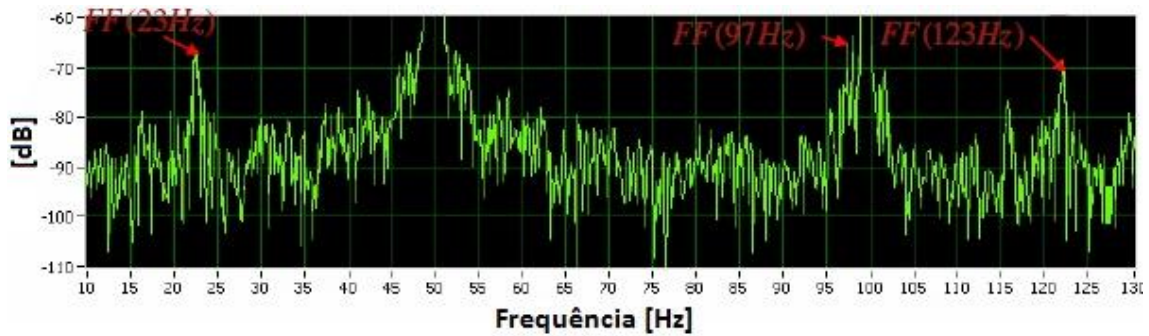


Figura 2.30 - Espectro de potência de motor com furo de 4mm na pista externa do rolamento com carga total

Pela análise dos resultados, vê-se que as falhas na pista externa podem ser detectadas com o uso dessa técnica para diferentes níveis de avaria, sendo que mais uma vez a amplitude das frequências características cresce com a piora da falha. Porém, para avarias na pista interna a detecção de falhas menores se torna difícil, já que a amplitude das frequências características são muito pequenas, o que as tornam difíceis de serem identificadas mesmo na condição de operação com carga.

Um resumo da identificação das falhas para cada diâmetro de furo pode ser visto nas Tabelas 2.6 e 2.7:

Tabela 2.6 – Resumo dos resultados para avaria na pista interna

Figura	Condição de operação	Diâmetro do furo	Frequências de falha (FF)						Observações
			FF (Hz)	Mag (dB)	FF (Hz)	Mag (dB)	FF (Hz)	Mag (dB)	
2.23	Sem carga	2 mm	68	-78	168	-77	187	-78	FF difícil de ser identificada
2.25	Carga Total	2 mm	60	-76	160	-74	170	-76	FF difícil de ser identificada
2.24	Sem carga	4 mm	68	-75	168	-74	187	-76	FF facilmente identificada
2.26	Carga Total	4 mm	60	-68	160	-68	170	-70	FF facilmente identificada

Tabela 2.7 – Resumo dos resultados para avaria na pista externa

Figura	Condição de operação	Diâmetro do furo	Frequências de falha (FF)				Observações
			FF (Hz)	Mag (dB)	FF (Hz)	Mag (dB)	
2.27	Sem carga	2 mm	29	-76	129	-73	FF facilmente identificada
2.29	Carga Total	2 mm	23	-72	123	-73	FF facilmente identificada
2.28	Sem carga	4 mm	29	-69	129	-70	FF facilmente identificada
2.30	Carga Total	4 mm	23	-67	123	-69	FF facilmente identificada

A dificuldade em se distinguir no espectro de corrente os padrões de defeito característicos de rolamentos de ruídos e de outros componentes torna a identificação de defeitos localizados mais simples por análise de vibração [6].

2.3.4. Defeitos observados na carga e no sistema de transmissão

A detecção de avarias no sistema de transmissão e carga é possível, pois oscilações no torque da carga causadas por essas falhas afetam a corrente do estator da mesma forma que as falhas mecânicas comentadas anteriormente assim, a técnica de ESA pode ser aplicada para observar essas variações e detectar as avarias.

O sistema de transmissão é composto pela caixa de engrenagens (reductor), polias e correias. Se na caixa de engrenagens não existir uma mudança de velocidade não é possível identificar a localização exata da avaria na transmissão, pois a frequência característica de falha seria uma só.

Em [38] vê-se os principais padrões para detecção de falhas na carga:

a) Defeitos no reductor

Os defeitos mais comuns em redutores são desgaste ou quebra de dentes das engrenagens e folga ou empeno nos eixos e rolamentos. Para monitorar essas falhas pode-se fazer uso da frequência de giro da entrada, da saída e da frequência de engrenamento (identifica problemas no contato entre as engrenagens).

Uma avaria na engrenagem, por exemplo, um dente danificado, produz uma anormalidade no torque de carga que é transferida para a corrente do motor. Dependendo do grau da avaria frequências características aparecem no espectro de corrente [46,47].

Além disso, qualquer oscilação mecânica no reductor causará excentricidades no entreferro da máquina e mudanças na forma de onda do fluxo do entreferro. Como já comentado, essa

consequência induz componentes de corrente no estator que podem então ser detectadas para análise da avaria. As componentes específicas induzidas, segundo [48,49], são indicadas por:

$$f_e = f_1 \pm m \cdot f_r \dots \quad [2.14]$$

Onde:

f = frequência de alimentação [Hz]

f_r = frequência da rotação da máquina [Hz]

m = ordem do harmônico 1,2,3 ...

f_e = componente que causa a mudança no entreferro [Hz]

Para se obter a frequência de giro de cada engrenagem, basta utilizar a relação de transformação entre elas obtida através do número de dentes [6].

Em [7] pode ser visto um estudo para a detecção de defeito na engrenagem do redutor. Nessa pesquisa um dente da engrenagem foi quebrado e o sistema foi ensaiado com e sem carga aplicada, antes e depois da avaria ser implementada. Os espectros a seguir mostram os resultados do experimento:

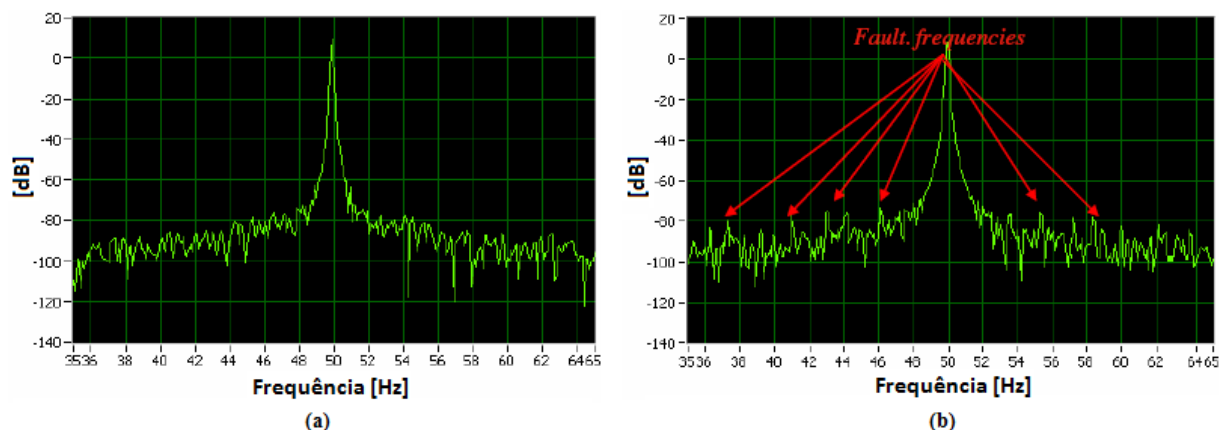


Figura 2.31 - Espectro de potência para motor com (a) redutor saudável (b) falha no redutor

Sempre que o dente removido passa pela engrenagem o motor sofre um choque que dá origem a duas componentes simetricamente distribuídas que, nesse caso, são de 1,72 Hz em torno da

frequência de alimentação (50 Hz no caso). Ou seja, nesse caso as frequências de rotação são 48,27 Hz e 51,72 Hz e suas frequências harmônicas estão distribuídas simetricamente em torno da frequência de alimentação em 3,44 Hz, 5,16 Hz, 6,89 Hz etc. Dessa forma observando essas frequências características no espectro de potência pode-se detectar a avaria.

b) Defeitos em polias e correias

Os principais defeitos em polias e correias são: polia excêntrica, polia com folga, desbalanceamento do conjunto, correia frouxa, rachada ou esticada em excesso.

Para que se possa identificar qual das polias (movida ou motora) possui uma avaria é necessário que exista uma relação de transformação do conjunto “polia-correia” já que a identificação da falha se dá através do monitoramento das frequências de giro e caso não exista relação entre elas a frequência característica de ambas seria a mesma.

Os defeitos na polia motora são identificados através da frequência característica indicada pela Equação 2.15 discutida em [6]:

$$f_p = f \pm k \cdot f_r \quad (2.15)$$

Onde:

f = frequência de alimentação [Hz]

k = ordem da harmônica (1,2,3...)

f_r = velocidade rotórica da polia motora [Hz]

Já para se monitorar avarias na polia movida faz-se uso da relação de transformação do sistema e a frequência característica de falha é pela Equação 2.16:

$$f_p = f \pm k \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot f_r \quad (2.16)$$

Onde:

f = frequência de alimentação [Hz]

k = ordem da harmônica (1,2,3...)

f_r = velocidade rotórica da polia motora [Hz]

d_1 = diâmetro da polia motora

d_2 = diâmetro da polia movida

As avarias na correia também causam vibrações no sistema e contribuem para o aumento de suas componentes espectrais. A frequência característica de falha em correias é dada pela equação:

$$f_b = f \pm k \cdot \left(\frac{d}{l} \cdot \pi \cdot f_r\right) \quad (2.17)$$

Onde:

f = frequência de alimentação [Hz]

k = ordem da harmônica (1,2,3...)

f_r = velocidade rotórica da correia [Hz]

d = diâmetro da polia motora

l = comprimento interno da correia

Assim, basta-se obter informações construtivas relativas às polias e correias que pode-se encontrar as frequências características de falhas para cada uma delas, e observar nos espectros medidos a presença ou não da avaria.

2.3.5 Defeitos nos enrolamentos do estator

Avarias nos enrolamentos do estator, como curto entre espiras, criam um desequilíbrio nas correntes do motor que pode ser monitorado através de seus espectros. Normalmente a severidade dessas falhas evolui muito rapidamente após a avaria surgir o que torna necessária a detecção do problema em estágio inicial.

Como curtos nos enrolamentos do estator geram alterações significativas na corrente estatórica o diagnóstico também pode ser baseado na análise do desbalanço de correntes da máquina, já que essa deve aumentar com o aparecimento dessa avaria.

Ainda segundo [48] para motores com controle de velocidade ou torque pode-se monitorar essa avaria através dos harmônicos de sequência zero, ou seja, monitorando-se os harmônicos múltiplos de três.

Já [33] mostra que se pode monitorar esses desequilíbrios entre as correntes para motores em malha aberta utilizando o vetor de Park através de harmônicos de sequência negativa.

Thomson em [50] propõe o uso das frequências características dadas pela Equação 2.18 para o monitoramento de falhas nos enrolamentos do estator de motores de baixa tensão:

$$f_{cc} = f \cdot \left[n \cdot \left(\frac{1-s}{\frac{p}{2}} \right) \pm k \right] \quad (2.18)$$

Onde:

f = frequência de alimentação [Hz]

n e k = inteiros 1,2, e 3

s = escorregamento em p.u.

p = número de polos da máquina

Dependendo das variáveis n e k as componentes dadas pela Equação 2.18 coincidem com as frequências características de falhas de excentricidade e de barras quebradas dificultando a correta avaliação do motor.

Penrose em [51] propõe outra forma de se encontrar as frequências características de falhas nos enrolamentos do estator através da Equação 2.19:

$$f_{estator} = f \cdot \left[\left(k \cdot R \pm n_E \right) \cdot \left(\frac{1-s}{\frac{p}{2}} \right) \pm n_M \right] \quad (2.19)$$

Onde:

f = frequência de alimentação [Hz]

k = inteiro 1,2, e 3

s = escorregamento em p.u.

p = número de polos da máquina

R = número de ranhuras do motor

n_E = ordem do harmônico de avaria elétrica igual a 0, 1, 2, 3, 4, 5...

n_M = ordem do harmônico de avaria mecânica igual a 1, 3, 5, 7, 9...

Para $n_E = 0$ as frequências encontradas são relativas a falhas mecânicas no estator já para $n_E = 1, 2, 3, 4, 5...$ as frequências se relacionam com as avarias elétricas. Se considerarmos o espectro de corrente demodulado, temos que $n_M = 0, 2, 4, 6...$

Para motores de alta tensão, avarias no isolamento podem ainda ser monitoradas através de surtos de correntes chamados de descargas parciais, ocasionados pelo baixo isolamento entre enrolamentos ou entre um enrolamento e a carcaça.

Em [7] pode ser visto um estudo para a detecção de diferentes níveis de falhas de enrolamento em motores com diferentes condições de cargas. A técnica utilizada no estudo comparativo que será mostrada aqui foi a FFT, mas também foram testados no estudo os métodos de Transformada Gabor, Transformada de Wavelet e o Vetor de Park. As frequências de falhas de curto-circuito analisadas no espectro de corrente são as dadas pela equação 2.18.

Foram realizadas medições de corrente para um motor com enrolamento do estator saudável e também para a mesma máquina com um número diferente de bobinas em curto na mesma fase, com e sem carga aplicada à máquina.

Os resultados obtidos nos estudo vêm representados nos espectros a seguir:

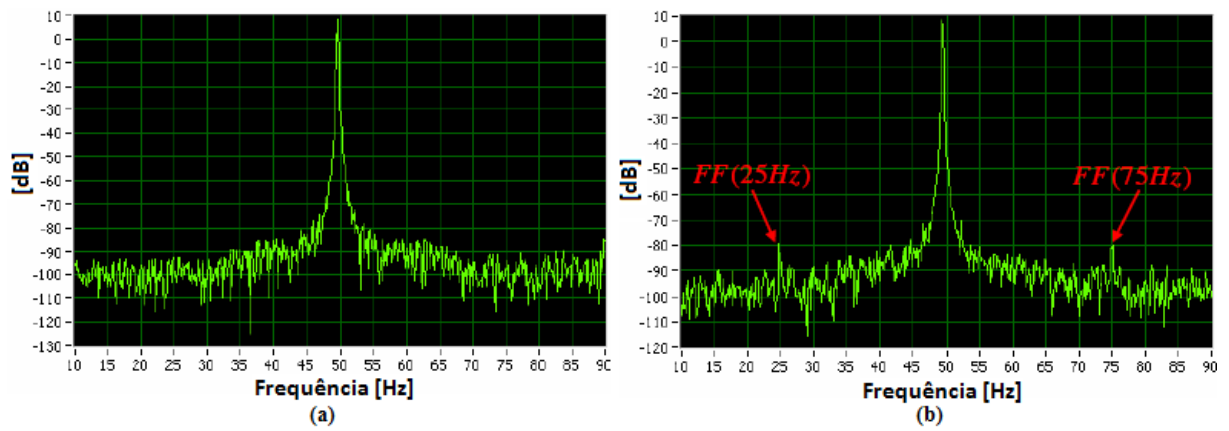


Figura 2.32 - Espectro de potência de um motor sem carga (a) saudável (b) com 5% de curto

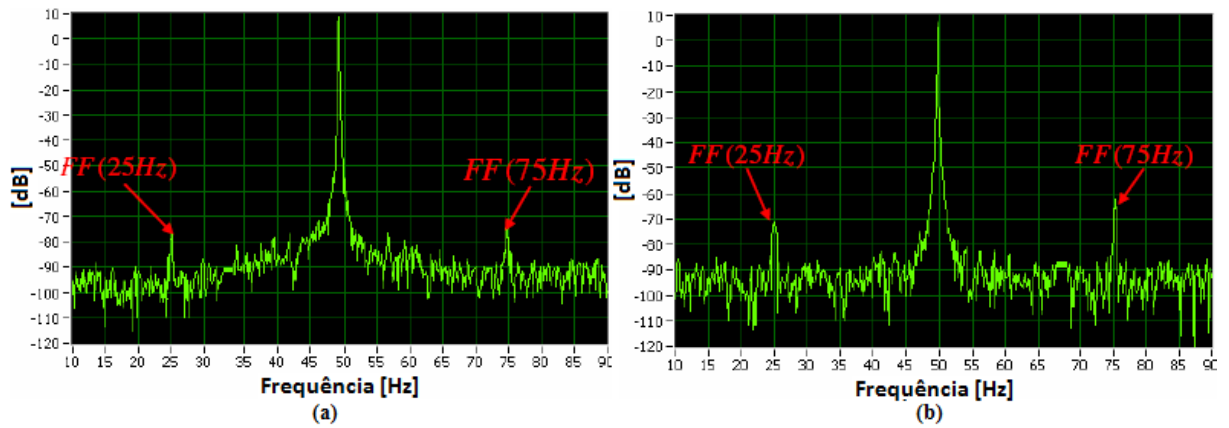


Figura 2.33 - Espectro de potência de um motor sem carga com curto de (a) 15% (b) 30%

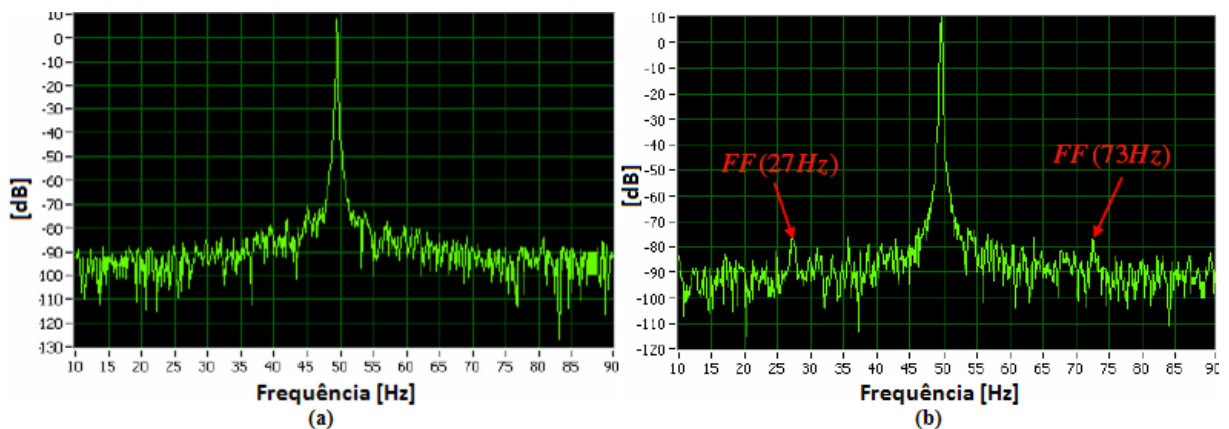


Figura 2.34 - Espectro de potência de um motor com carga (a) saudável (b) com 5% de curto

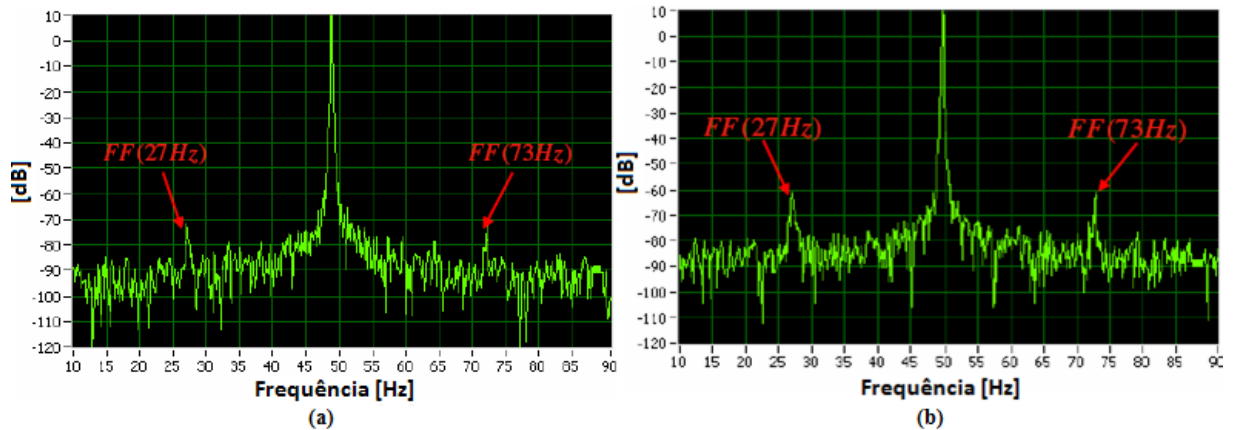


Figura 2.35 - Espectro de potência de um motor com carga total com curto de (a) 15% (b) 30%

Mais uma vez para diferentes níveis de falhas a magnitude das componentes de falha aumenta com a presença de carga aplicada á máquina, da mesma forma que as amplitudes aumentam com a piora da avaria. Vê-se também que as frequências obtidas matematicamente foram as mesmas encontradas pelo experimento e que em todos os casos puderam ser visualmente constatadas garantindo a eficácia do método proposto. A tabela 2.8 resume os resultados dos ensaios:

Tabela 2.8 - Resumo dos resultados obtidos

Figura	Porcentagem de curto no enrolamento	Condição de carga	Frequências de falha (FF)				Observação
			Banda lateral inferior		Banda lateral superior		
			FF [Hz]	Mag. [dB]	FF [Hz]	Mag. [dB]	
2.32 (b)	5%	Sem carga	25	-80	75	-80	Visível
2.34 (b)	5%	Carga total	27	-77	73	-77	Visível
2.33 (a)	15%	Sem carga	25	-77	75	-75	Visível
2.35 (a)	15%	Carga total	27	-72	73	-72	Visível
2.33 (b)	30%	Sem carga	25	-71	75	-62	Visível
2.35 (b)	30%	Carga total	27	-60	73	-60	Visível

Em [52] é feito um estudo para a detecção de curto-circuito entre as espiras do estator e conclui-se que o melhor parâmetro para tal detecção é a impedância de sequência negativa que pode ser obtida através de medições das correntes e tensões de alimentação da máquina. O valor dessa variável não depende da carga nem do grau de desequilíbrio entre as tensões de alimentação do motor e varia significativamente com o número de espiras em curto se mostrando dessa forma, eficaz para o monitoramento dessa avaria. As tabelas a seguir

evidenciam a variação dessa variável independentemente das condições operacionais da máquina.

Tabela 2.9 - Variação da impedância negativa para desequilíbrio de 0,8%

Porcentagem de curto entre espiras [%]	Condição	Ipos (A)	Ineg (A)	Zpos (A)	Zneg(A)
0	Carga nominal	84,85	4,48	38,43	7,12
0,01	Carga nominal	85,74	4,51	38,03	6,22
0,03	Carga nominal	87,59	9,18	37,22	3,07
0	Carga reduzida	44,86	4,48	72,72	7,12
0,01	Carga reduzida	46,43	4,51	70,21	6,22
0,03	Carga reduzida	49,73	9,18	65,57	3,07

Tabela 2.10 - Variação da impedância negativa para desequilíbrio de 1%

Porcentagem de curto entre espiras [%]	Condição	Ipos (A)	Ineg (A)	Zpos (A)	Zneg(A)
0	Carga nominal	85,06	5,28	38,23	7,12
0,01	Carga nominal	85,94	5,51	37,84	6,54
0,03	Carga nominal	87,78	9,47	37,05	3,96
0	Carga reduzida	44,91	5,28	72,42	7,12
0,01	Carga reduzida	46,5	5,57	69,94	6,55
0,03	Carga reduzida	49,77	9,47	65,34	3,96

2.3.6 Qualidade de energia

Além de fornecer os espectros de frequência da corrente do motor de indução para as análises espectrais, a técnica de ESA é capaz de fornecer dados referentes à qualidade de energia e circuito de alimentação da máquina sendo assim, é possível avaliar o rendimento e as condições de operação do motor.

Em [53] é investigado o efeito negativo de desbalanços e distorções da tensão de alimentação sobre o envelhecimento térmico do isolamento, quantificando as perdas devidas a esses fatores entre 1 e 2 bilhões de dólares ao ano. Os valores desses parâmetros são facilmente encontrados através da técnica em questão e podem, inclusive, serem monitorados continuamente para máquinas críticas.

Alguns dos principais parâmetros que serão monitorados pelo equipamento e fazem parte das técnicas ESA serão comentados a seguir.

a) Distorção total harmônica (Total Harmonic Distortion - THD)

Uma distorção na forma de onda é chamada harmônica quando a deformação ocorre de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental causada principalmente por não-linearidades entre tensão e corrente que são características de certos componentes da rede, por exemplo, transformadores e motores que possuem núcleos sujeitos a saturação. Outros componentes que causam harmônicos na rede são os conversores eletrônicos, pontes e compensadores estáticos devido ao chaveamento de correntes que impõem no sistema. Todos esses componentes estão presentes em grande quantidade no meio industrial e causam os efeitos negativos comentados logo mais.

A THD é normalmente especificada em porcentagem (%) ou decibel (dB) e representa a soma RMS dos harmônicos da alimentação dividida pelo valor da fundamental. A THD pode ser calculada pela seguinte equação 2.15:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^n V_j^2}}{V_1} \quad (2.15)$$

Onde

V_j = valor eficaz do j-ésimo harmônico, obtidos a partir da transformada de Fourier sobre os valores instantâneos de tensão.

V_1 = valor eficaz da frequência fundamental

O valor do THD indica então a significância do conteúdo harmônico de um sinal quando comparado à componente fundamental.

Todo o sistema elétrico trifásico, incluindo os motores de indução, é projetado para trabalhar com tensões e correntes senoidais, por isso, altos valores de THD podem causar sérios riscos aos equipamentos, por exemplo, se correntes simétricas possuem harmônicas múltiplas de 3 da frequência de alimentação (terceira, nona, décima quinta etc) estas frequências apresentam sequência nula fazendo com que condutores neutros aqueçam e equipamentos elétricos tenham sua eficiência reduzida.

Alguns outros efeitos de altos valores de THD [54]:

- i) Excitação de correntes ou tensões ressonantes entre indutâncias e capacitâncias;
- ii) Aparecimento de vibrações e ruído;
- iii) Sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos (gerando aumento de perdas por histerese e correntes parasitas em núcleos de motores, geradores, transformadores, etc.);
- iv) Sobreaquecimento de capacitores;
- v) Erro de medição de grandezas elétricas;
- vi) Erro de controle de conversores;
- vii) Erro de atuação da proteção;
- viii) Sobrecorrente de neutro;
- ix) Interferências e ruídos eletromagnéticos.

b) Correntes e tensões

Os valores das correntes e tensões de alimentação da máquina também devem ser monitorados com o intuito de identificar valores anormais que indiquem a presença de falha na alimentação ou no motor.

Altos desbalanços entre as tensões ou correntes, sobretensões ou sobtensões na alimentação, como já comentado, induzem altas temperaturas internas na máquina diminuindo a vida útil do isolamento e provocando danos aos enrolamentos.

c) Potências

Como toda falha causa perda de energia e diminuição na eficiência da máquina pode-se obter informações a respeito do consumo do motor e utilizá-las para a análise da condição da máquina. A seguir serão explicadas brevemente as potências que se relacionam ao desempenho do motor de indução [55]:

Potência ativa (P): é a energia que é efetivamente convertida em trabalho pelo equipamento. É definida como o valor médio da potência instantânea;

Potência reativa (Q): é energia que produz os campos magnéticos necessários para o funcionamento de diversas máquinas como, por exemplo, motores e transformadores, e não está relacionada à realização de trabalho. Também é o resultado da operação de cargas onde a corrente é chaveada através de transistores, diodos, tiristores e etc.

Potência aparente (S): é o resultado da soma fasorial das potências ativa, reativa e harmônica

Fator de Potência (FP): é a relação entre a potência ativa e a potência aparente representando a capacidade do sistema de realizar trabalho diante da potência total disponível;

A Figura 2.36 mostra a relação entre esses parâmetros, o chamado triângulo de potências.

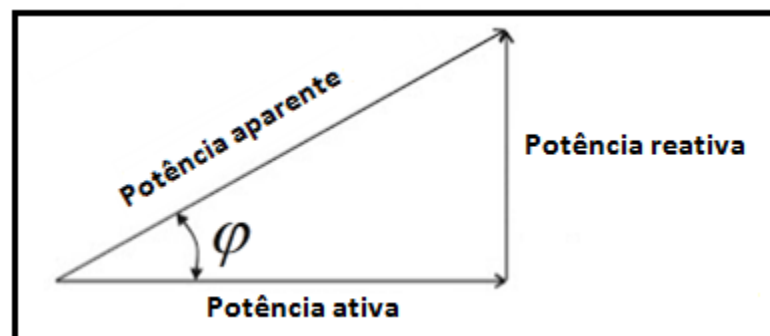


Figura 2.36 - Triângulo das potências

A diminuição do fator de potência ocorre com o aumento da energia reativa e, por consequência, aumento da corrente provocando maior aquecimento de condutores e equipamentos. Algumas vantagens em se monitorar e controlar essas grandezas são:

- i) Redução significativa do custo de energia elétrica evitando multas impostas pela concessionária devido a baixos fatores de potência;
- ii) Aumento da eficiência energética da empresa;
- iii) Aumento da capacidade dos equipamentos de manobra;
- iv) Aumento da vida útil das instalações e equipamentos;
- v) Redução do efeito Joule;
- vi) Redução da corrente reativa na rede elétrica.

3. Desenvolvimento do Equipamento

Nesse capítulo serão discutidos alguns aspectos do desenvolvimento do equipamento destinado a realização dos ensaios baseados nas técnicas de Análise da Assinatura Elétrica. O equipamento foi concebido para ser utilizado dentro de um processo de prestação de serviço, assim, algumas características de seu uso são específicas a esse tipo de processo.

Algumas características que serviram como requisitos ao desenvolvimento do equipamento:

- a) **Portátil:** atualmente existe uma tendência ao monitoramento contínuo de equipamentos críticos ao processo produtivo das indústrias, porém, o foco desse projeto é o desenvolvimento de um equipamento portátil, capaz de ser deslocado para os mais diversos ambientes industriais. Mesmo assim, a adaptação desse equipamento para seu uso contínuo é simples de ser implementada e será comentada nas propostas de trabalhos futuros.
- b) **Autonomia:** a proposta de ser um equipamento portátil gera a necessidade de autonomia e, devido à indisponibilidade de alimentação via rede elétrica em determinadas situações, foi adotado alimentação via baterias internas que devem durar o suficiente para um dia de trabalho.
- c) **Robustez:** o equipamento foi concebido para ser manuseado em ambiente industrial, assim, mecanicamente deve ser capaz de suportar tal uso. Avarias resultantes do transporte, manuseio, questões ambientais como umidade e temperatura devem ser evitadas.
- d) **Facilidade de uso:** o software desenvolvido deve ter uma interface com o usuário simples e amigável, proporcionando alertas quando algum ensaio não foi realizado corretamente e indicando a solução para tais casos, permitindo assim que o uso do equipamento possa ser realizado por qualquer pessoa dependendo apenas de um conhecimento técnico mínimo. Além disso, a conexão do equipamento com os motores monitorados também devem ser intuitiva e de fácil aplicação.
- e) **Ferramenta de análise:** o software de análise deve também ser de uso simples e proporcionar as ferramentas necessárias para a observação das variáveis e dos espectros medidos, como ferramentas de zoom, cursores de harmônico, filtros etc.

Além disso, através dessa ferramenta deve ser possível gerar os relatórios sobre a condição da máquina.

O equipamento foi desenvolvido utilizando das técnicas de ESA já discutidas nesse trabalho, assim, foi concebido para realizar os ensaios para análise dos espectros de corrente via MCSA além fornecer informações a respeito do desempenho da máquina. Os ensaios realizados, espectros e as variáveis obtidas serão comentadas mais adiante nesse capítulo.

O software desenvolvido em LabView, controla, adquire, processa, salva e envia os sinais ao software analisador, onde o analista possui as ferramentas necessárias à análise.

3.1 LabView

O LabView é uma linguagem de programação gráfica de propriedade da National Instruments e possui ambientes de desenvolvimento integrados para Windows, Linux e Solaris.

Os softwares desenvolvidos em LabView são chamados de instrumentos virtuais (VIs) e são compostos pela interface com o usuário e pelo diagrama de blocos onde estão os códigos gráficos do programa. O software não é processado por um interpretador, mas sim compilado, em que a linguagem tem vantagens na aquisição e manipulação de dados.

Foi escolhido para esse trabalho por sua facilidade e grande agilidade de programação, já que devido ao fato de ser uma linguagem já bastante consolidada e usada em estudos anteriores, possui uma biblioteca extensa de ferramentas para processamento de sinais, análise, visualizações etc.

Alguns dos benefícios de se usar a linguagem LabView segundo [56]:

- Velocidade de compilação de código e habilidade para criar EXEs e DLLs distribuíveis;
- Projeto poderoso, flexível e escalável (aberto e compatível com bibliotecas externas e ferramentas de terceiros);

- Fácil de aprender, usar, manter, e atualizar (programação gráfica intuitiva, usando construtores gráficos);
- Uso multidisciplinar;
- Forte integração entre hardware e software sendo compatível com uma grande variedade de dispositivos de aquisições de dados e controle embarcado;
- Projeto preparado para multicore (paralelismo intrínseco) e suporte para tecnologias de aceleração de hardware (DSPs, FPGAs e GPUs como co-processadores);
- Ambiente para múltiplas plataformas (Windows, Mac OS, Linux, RTOSs);
- Longevidade (baseado em soluções comerciais, mais de 20 anos de evolução);
- Habilidade de resolver e executar algoritmos complexos em tempo real (EDOs, EDPs, álgebra linear baseada em BLAS, processamento e análise de sinais, otimização etc.) usando sinais reais;
- Ponte para a indústria: mesma ferramenta usada no meio acadêmico e industrial (transição facilitada entre ambiente acadêmico para industrial, transferência de tecnologia mais transparente);
- Redução de tempo de prototipagem, tempo de descoberta, tempo de implementação e tempo de lançamento;
- Ajuda a desenvolver algoritmos melhores e de maneira mais rápida.

3.2 Modelo de negócio da prestação de serviços

O equipamento foi concebido para ser utilizado dentro de um modelo de prestação de serviços de manutenção preditiva, assim uma breve discussão sobre esse modelo de negócio é dada aqui.

Essas empresas atendem a indústrias de diversos setores sendo que sempre que um serviço é vendido é feito um cadastro dos equipamentos a serem monitorados e definido a cadência de medição (intervalo entre as medidas). O cadastro dos equipamentos contém todas as informações nominais do motor bem como suas características construtivas que serão utilizadas pela técnica de ESA, possui também variáveis da identificação da máquina dentro

da planta em questão como, por exemplo, a área e setor a qual ele pertence e uma tag de identificação. Foi desenvolvido também um software específico para a realização desse cadastro das máquinas onde o usuário pode, utilizando da mesma plataforma, adicionar ou excluir um equipamento ou atualizar os dados gerando uma ordem de serviço nova para ser utilizada como dado de entrada do software de coleta de forma simples e rápida.

Nas datas determinadas pela cadência uma ordem de serviço é gerada e um técnico vai até a planta com o equipamento para realizar as medições. O software de coleta de dados do equipamento deve ser capaz de indicar ao operador quais máquinas devem ser monitoradas através da ordem de serviço que é inserida como dado de entrada.

Após os ensaios serem realizados os resultados ficam disponíveis e são enviados via internet. Esses dados chegam diretamente para uma equipe de analistas onde a ferramenta de análise plota todos os resultados necessários.

Esses resultados são inseridos em um banco de dados e é possível analisar também a curva de tendência para cada máquina inspecionada. Quando uma avaria é detectada um relatório é gerado e enviado à empresa contratante indicando a causa da falha e as possíveis ações a serem tomadas.

A Figura 3.1 ilustra o processo descrito:

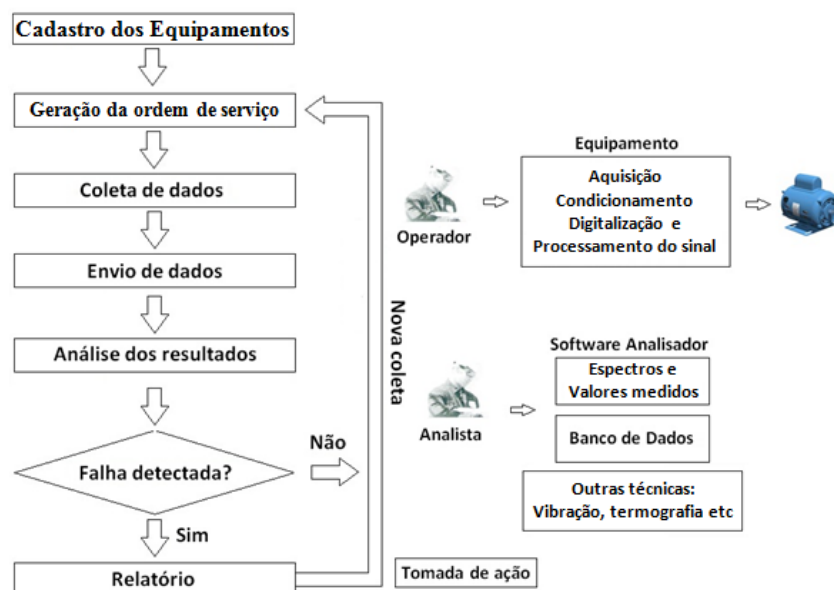


Figura 3.1 - Modelo de negócio da prestação de serviços

3.3 Desenvolvimento do hardware

Por hardware aqui se define não só a eletrônica do equipamento, mas também todos os periféricos e sensores necessários para a realização dos ensaios.

O hardware foi desenvolvido para atender as necessidades de medição, condicionamento e chaveamento dos sinais, além de garantir robustez mecânica e atender aos requisitos de portabilidade e autonomia.

Além dos itens demonstrados individualmente a seguir o equipamento conta ainda com notebook onde o software desenvolvido roda, maleta para transporte, carregadores etc que não serão discutidos.

3.3.1 Eletrônica

A eletrônica do equipamento foi desenvolvida via software de simulação e testes em bancada, após isso foram fabricados protótipos da placa para os testes iniciais.

A figura 3.2 representa o diagrama em blocos do hardware da placa de circuito impresso desenvolvida:

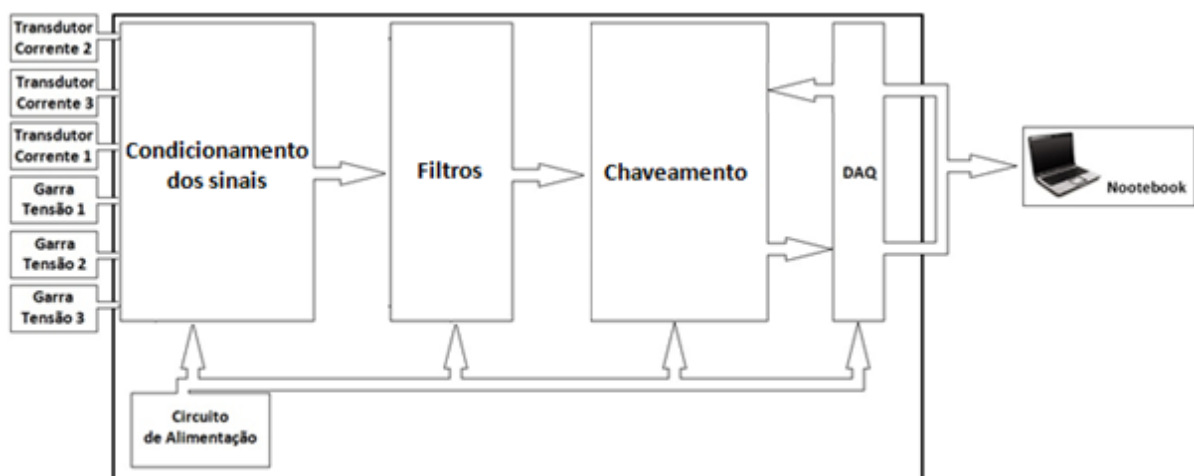


Figura 3.2 - Diagrama em blocos do hardware

- a) **Condicionamento do sinal:** o equipamento é capaz de realizar medições para diferentes tipos de motores de indução com diversas características nominais, assim tanto o hardware quanto o software devem estar preparados para selecionar os melhores ganhos para cada sinal medido além de condicionar adequadamente o sinal.
- b) **Filtros:** etapa necessária para eliminar frequências indesejáveis e ruídos no sinal. Via software outra etapa de filtragem específica é realizada para garantir os parâmetros necessários a cada ensaio.
- c) **Chaveamento:** em cada momento dos ensaios uma combinação diferente de sinais deve ser adquirida sendo que o chaveamento correto é controlado pela DAQ.
- d) **Circuito de alimentação:** a alimentação do equipamento é realizada através de um pack de baterias e esse circuito trata da criação das tensões necessárias à alimentação propriamente dita da placa e do controle de carga do pack.

A Figura 3.3 é uma foto da placa de circuito impresso desenvolvida.

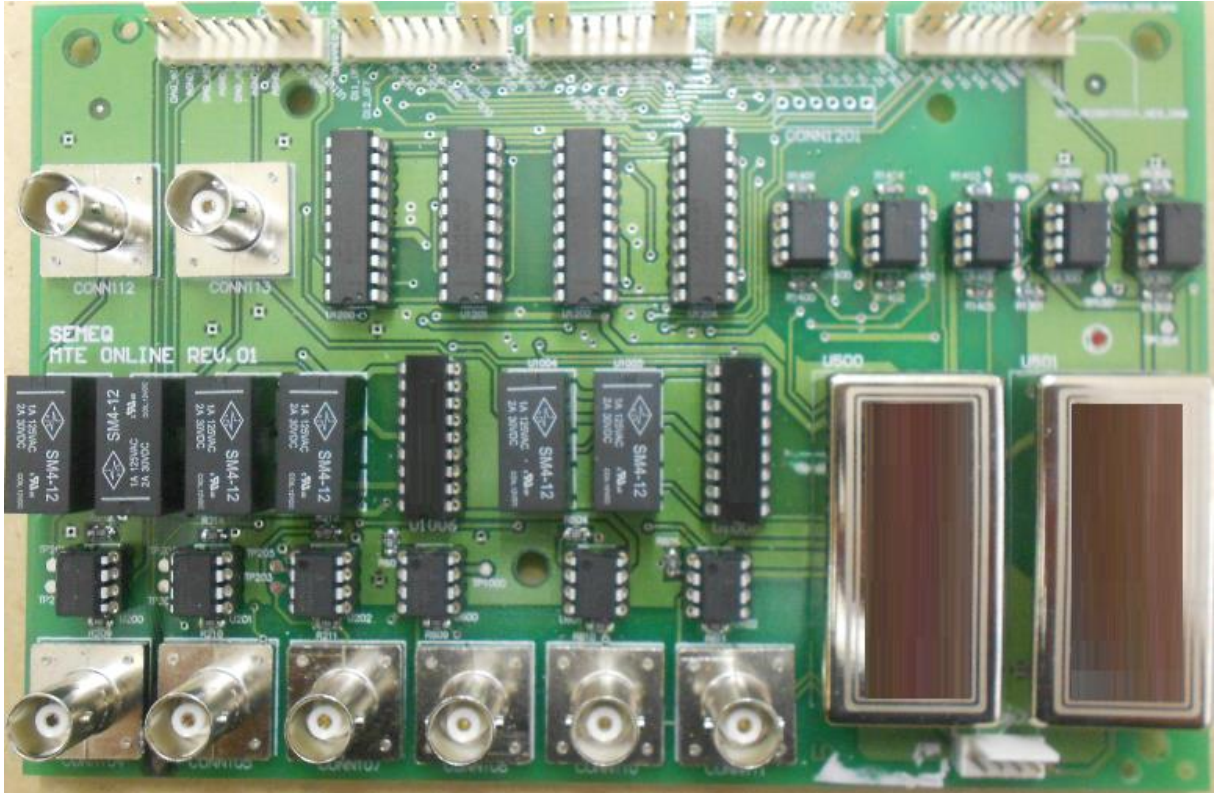


Figura 3.3 - Placa de circuito impresso desenvolvida

3.3.2 Seleção das garras de tensão e sensores de corrente

Um estudo foi realizado para a determinação das faixas máximas de leituras para as medições de tensão e corrente. Foi determinado que o equipamento deve ser capaz de realizar medições em motores alimentados com até 1000 V (pico) e correntes nominais de até 3000 A (RMS).

Motores com tensões e correntes nominais superiores aos limites do equipamento só podem ser medidos na presença de Transformadores de Corrente (TCs) e Transformadores de Potencial (TPs) sendo necessária apenas uma indicação no software quando for o caso.

Para as leituras das correntes foram selecionadas os seguintes modelos de garras amperimétricas:

- i) Medições em motores de corrente nominal máxima 150 A: AC Current Probe - Model MN353

Tabela 3.1 - Garra de corrente MN353

Características Elétricas - Modelo MN353	
Faixa nominal	150 A
Faixa de medições	0,1 a 150 A
Relação de transformação	10 mV/A (1V @ 100 Aac)
Sinal de Saída	Tensao
Precisão:	
0,1 a 1A	2% da leitura +- 0.2mW
1 a 80A	1% da leitura +- 0.2mW
80 a 150 A	1,5% da leitura +- 0.2mW
Defasagem:	
1 a 20A	< 3,0°
20 a 100A	< 2,0°
100 a 150A	< 2,5°
Sobrecarga	240 A para 10 min ON, 30 min Off
Faixa de frequência	40 a 10 kHz

ii) Medições em motores com corrente nominal até 3000 A: flex probe Model 24-3001.

Tabela 3.2 - Garra de corrente 24-3001

Características Elétricas - Modelo 24-3001	
Faixa de medições	300/3000 Aac
Sinal de Saída	Tensão (4 V de pico máximo)
Precisão	1% da leitura +- 500mA
Defasagem	<0,7° em 50 ou 60 Hz
Tensão de trabalho	1000 Vrms máximo
Alimentação	Bateria alcalina de 9V

Para as leituras das tensões foram selecionadas garras jacarés isoladas para 1000 V como as indicadas na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Garras de tensão

3.3.3 Seleção da DAQ

A DAQ selecionada foi USB-1208HS-4AO e suas especificações se encontram abaixo:

Tabela 3.3 - DAQ utilizada

Entradas analógicas	
Número de canais	8 simples ou 4 diferenciais
Range (Bipolar)	- 20 para 20V, -10 para 10, -5 para 5, -2,5 para 2,5
range (Unipolar)	0 a 10 V
Resolução	13 bits
Taxa de amostragem	1 Ms/s
Saídas analógicas	
Resolução	4
Taxa de atualização	12 Bits
Range (Bipolar)	1 Ms/s
I/Os Digitais	
Número de canais	16

3.3.4 Bateria

Foi selecionado um pack de baterias de Li-ion recarregável, suas especificações seguem na Tabela 3.4:

Tabela 3.4 - Bateria utilizada

Capacidade	6600 mAh
Tensão	10.8V
Dimensões	69 x 54 x 54 mm
Peso	430 gramas
Maxima corrente de carregamento	2.0 A
Maáxima corrente de descarga	6.5 A
Tensão de cut off	proteção de carregamento: 13V proteção de descarga: 7.2V

O pack de baterias é recarregado através de um conector existente na tampa do equipamento e foi selecionado por sua robustez, segurança e relação capacidade/peso.

3.4 Desenvolvimento do Software

O software foi desenvolvido utilizando LabView e é capaz de controlar as medições, processar os sinais e salvar os resultados obtidos, além disso, é intuitivo e indica ao usuário possíveis problemas que ocorram durante os ensaios. É dividido em 5 telas sendo a primeira delas a tela de “Configurações” e as outras são referentes aos ensaios específicos, uma breve explicação de cada uma delas será dada a seguir.

3.4.1 Tela de Configurações

Assim que iniciado, o software pede que o usuário selecione a Ordem de Serviço (OS) para que as informações a respeito dos motores que devem ser ensaiados possam ser acessadas.

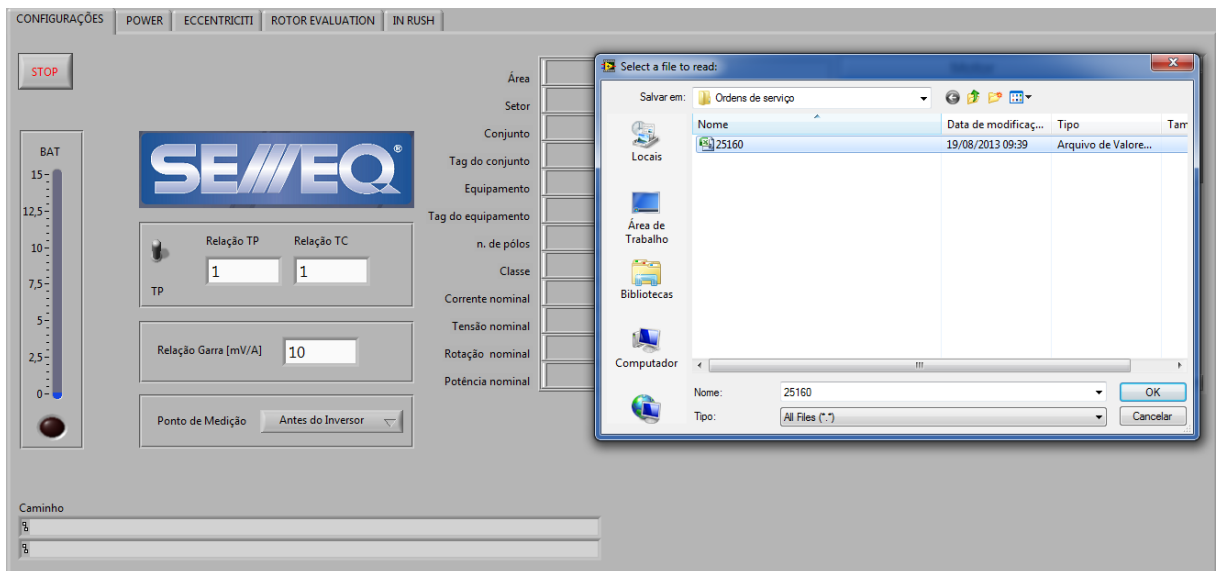


Figura 3.5 - Tela de configurações de seleção de OS software desenvolvido

Após a seleção da OS, algumas das informações cadastradas dos motores a serem monitorados ficam visíveis ao usuário como, por exemplo, os dados de placa da máquina e as variáveis de localização da mesma dentro da planta.

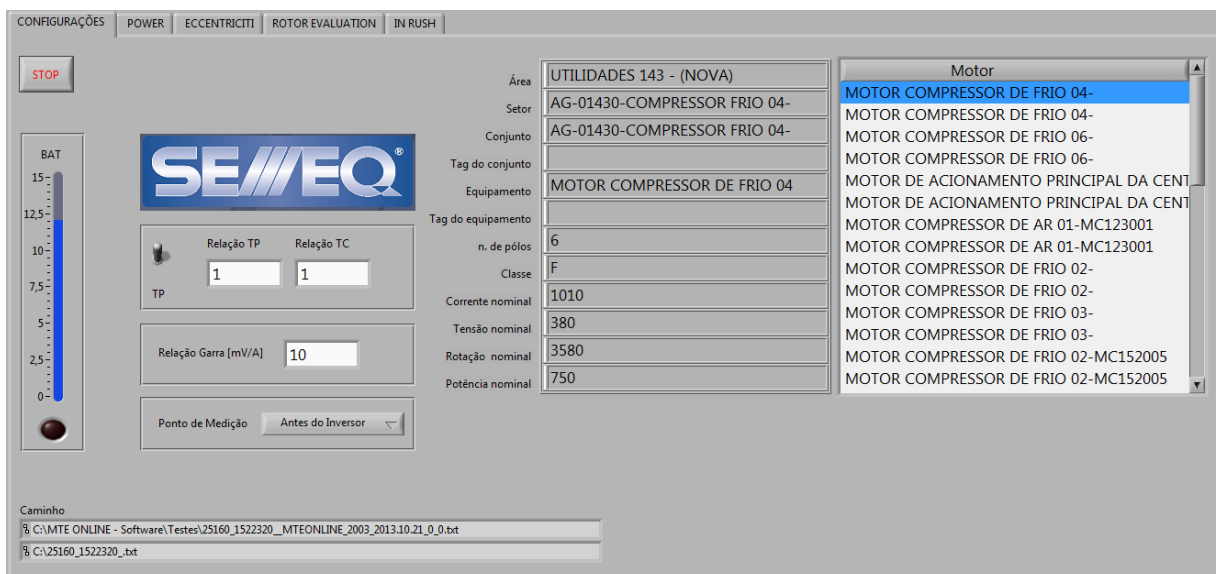


Figura 3.6 - Tela de configurações do software desenvolvido

A tela de “Configurações” conta ainda com uma indicação do nível da bateria do equipamento sendo que quando estiver abaixo da tensão nominal do pack, em valores estabelecidos via ensaios, o software indica a necessidade de re-carregamento e não permite que o usuário inicie as medidas a fim de evitar que essas sofram influência da falta de alimentação da eletrônica.

Os campos que devem ser preenchidos e selecionados pelo usuário são indicados a seguir:

- i) **Relação da Garra [mV/A]:** deve ser preenchido com a relação da garra amperimétrica utilizada, por exemplo, as garras que acompanham o equipamento tem relações de 1 mV/A ou 10 mV/A. Essa informação é de extrema importância para que o software seja capaz de calcular a amplitude da corrente do motor e outras variáveis que dela dependem.
- ii) **Relação TP e Relação TC:** para motores alimentados com tensões e correntes acima das especificadas como valores máximos que o equipamento pode monitorar as medições podem ser realizadas com tanto que a máquina possua transformadores de corrente e de potencial. Nesse caso, esses campos devem ser preenchidos com as relações de transformação e a chave indicada por “TP” deve ser setada.
- iii) **Ponto de medição:** É uma variável que indica onde o ensaio foi realizado para o analista assim, em alguns casos podem ser detectadas falhas em componentes do acionamento do motor, por exemplo, no chaveamento de inversores de frequência.

Além dessas variáveis, que são dados de entradas do software, o operador pode ver o nome dos arquivos gerados e onde serão salvos. Estes arquivos são os resultados finais dos ensaios e geram os espectros e as tabelas de dados que serão disponibilizados ao analista pelo software de análise.

Para evitar perda de resultados, os dados obtidos durante os ensaios são salvos automaticamente, sem necessidade do usuário interferir nesse processo, tanto em arquivos .txt quanto no banco de dados do equipamento.

3.4.2 Power

Através desse ensaio, diversas variáveis que dizem respeito ao desempenho e condição de operação da máquina são calculadas, algumas delas ficam disponíveis ao operador, outras apenas são salvas para serem utilizadas pelos analistas.

A Figura 3.7 indica a tela “Power” e os resultados obtidos em um teste experimental.

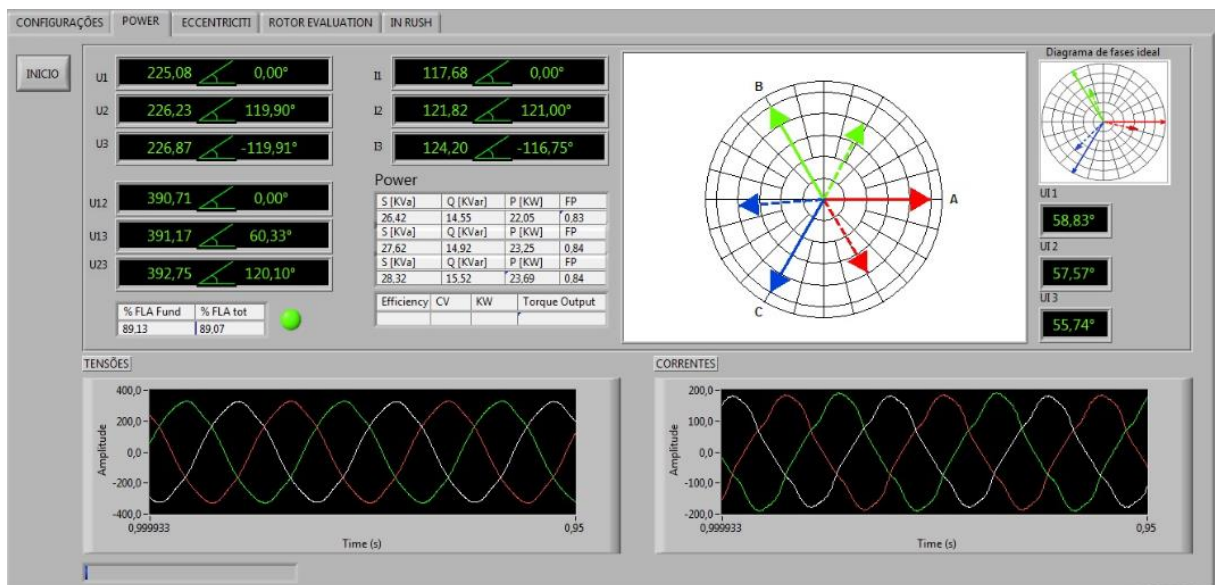


Figura 3.7 - Tela do ensaio Power do software desenvolvido

Ao final do ensaio ficam disponíveis ao operador do equipamento os valores das tensões fase-fase (amplitude e fase), tensões fase-neutro (amplitude e fase) e correntes (amplitude e fase), além dos valores de porcentagem de carga (FLA), potências da máquina (ativa, reativa, aparente e fator de potência) e informações sobre o desempenho.

Esse ensaio utiliza das informações das 3 correntes e 3 tensões de alimentação da máquina assim, para que as equações utilizadas nos cálculos sejam válidas é necessário que as conexões dos sensores de corrente e das garras de tensão sejam realizadas de maneira correta. O software é capaz de verificar e indicar via mensagens em caso de erro.

A Figura 3.8 mostra como as garras do equipamento devem ser conectadas nas fases de alimentação da máquina.

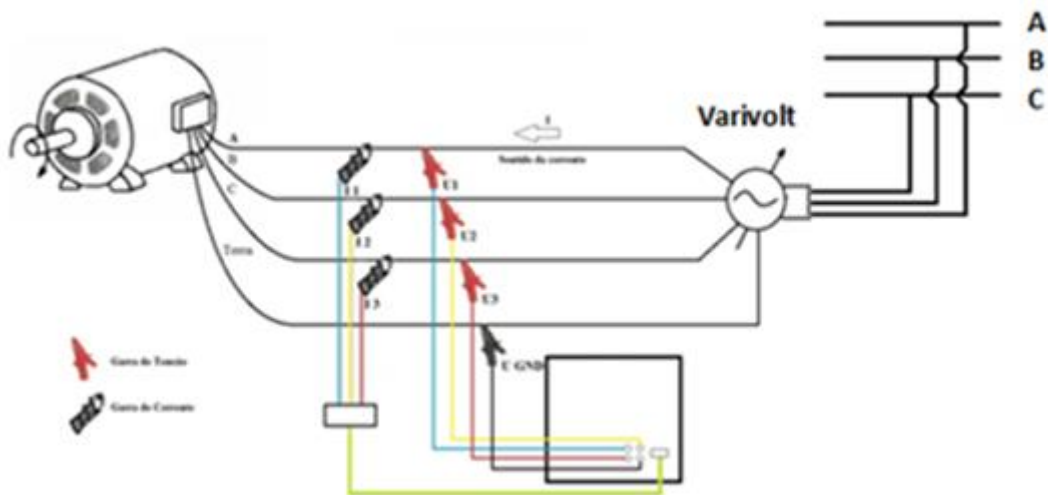


Figura 3.8 - Conexão do equipamento

Caso alguma das garras esteja trocada ou um sensor de corrente tenha sido colocado no sentido errado o software indicará a má conexão via mensagem e poderá ser observado qual das garras está mal posicionada através do diagrama fasorial como indicado na Figura 3.9.

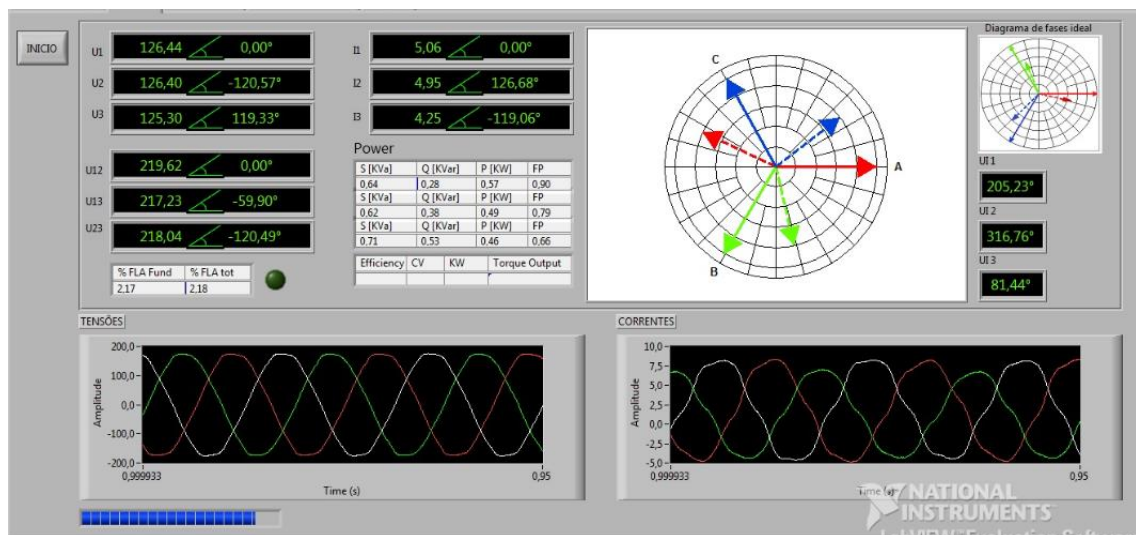


Figura 3.9 - Diagrama fasorial com garras trocadas

Uma seta indica o sentido que a corrente deve ter ao passar pelo anel da garra amperimétrica.



Figura 3.10 - Indicação do sentido da corrente nas garras amperimétricas

Na figura 3.9 pode-se observar o diagrama fasorial ideal à direita e a esquerda os resultados medidos, indicando que a garra de corrente colocada na fase A está trocada com a garra colocada na fase B. Visualmente o operador pode identificar o erro, corrigir a conexão e refazer as medições garantindo que as informações salvas estão corretas e poderão ser utilizadas pelo analista.

Na Figura 3.11 observa-se o caso da garra de corrente da fase A ter sido posta no sentido errado.

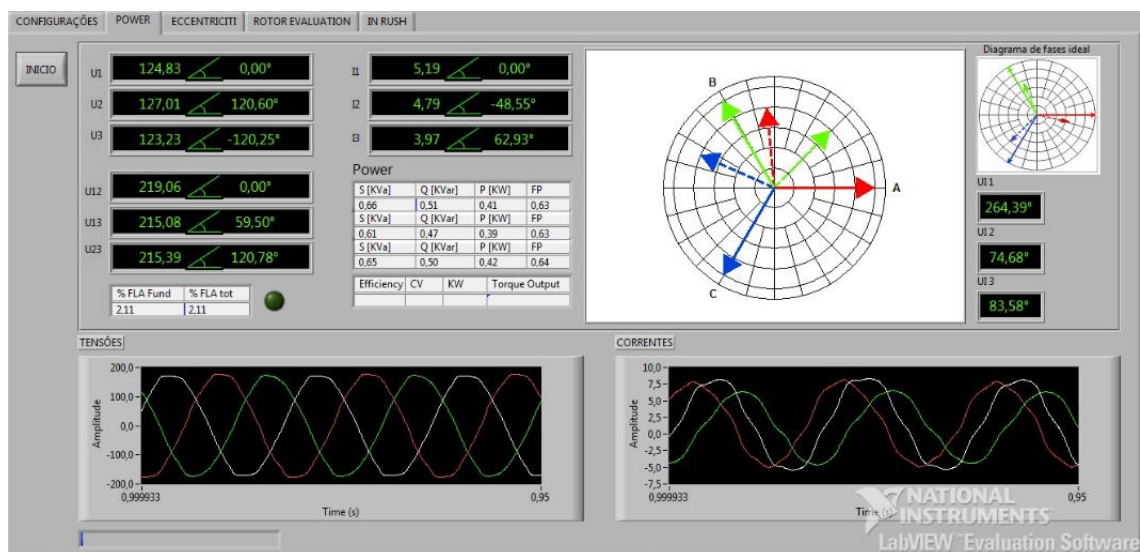


Figura 3.11 - Diagrama fasorial com garra invertida

Outra característica importante que deve ser observada pelo operador, é o valor de “FLA” que indica a porcentagem de carga que o motor opera no momento do ensaio. Como já foi discutido anteriormente, a amplitude das frequências características de falha encontradas nas técnicas de ESA sofrem influência direta da carga aplicada a máquina, assim, esse valor deve assumir um valor mínimo para que os resultados possam ser analisados de maneira confiável. O software indica via mensagem quando FLA assume valores menores que 70% e, nesse caso, o operador deve tentar negociar com os responsáveis pela máquina para aumentar a carga aplicada ao motor.

Os valores de média e desbalanço de tensões (fase-fase, fase-terra), correntes e impedâncias da máquina, fator de crista, distorção total harmônica, potências ativa, reativa, aparente e fator de potência, eficiência, tensões e correntes de sequência positiva, negativa e zero além do gráfico de barras de harmônicas e ondas no tempo são salvos para serem analisados pelo analista.

Todas as telas possuem o botão de “Início” para começar os ensaios e a barra de progresso no canto inferior esquerdo para o acompanhamento do teste. Além disso, ao final de todos os ensaios o software salva os resultados e avisa via mensagem que os resultados já estão disponíveis tornando sua utilização muito simples e intuitiva.

Os dados obtidos durante o ensaio “Power” são utilizados para determinar avarias na qualidade de energia, no circuito de alimentação e no estator da máquina.

a) Falhas no circuito de alimentação

Para a análise do circuito de alimentação da máquina se usa os valores calculados para os desequilíbrios de tensão e corrente e da degradação NEMA baseada nos desequilíbrios de tensão.

Conexões de altas resistências geram desequilíbrios de tensão que criam correntes de sequência negativa na máquina, essas correntes criam um campo magnético que gira no sentido contrário à rotação do motor diminuindo o torque e aumentando assim a temperatura. A perda de torque faz crescer o consumo de energia, o mesmo acontece com o

sobreaquecimento, nesse caso ainda são afetados a lubrificação e o verniz que sofre degradação.

Segundo a National Electrical Manufacturers Associations (NEMA) com um desequilíbrio de tensões fase-fase deve-se multiplicar a potência (HP) nominal da máquina pelo valor de degradação indicado na Figura 3.12. Pode-se observar que com o aumento dos desequilíbrios a máquina perde a capacidade de produzir trabalho mecânico (torque diminui) e não deve operar com desequilíbrios maiores que 5% tendo como consequência um significativo aumento na temperatura da máquina e danos nas bobinas.

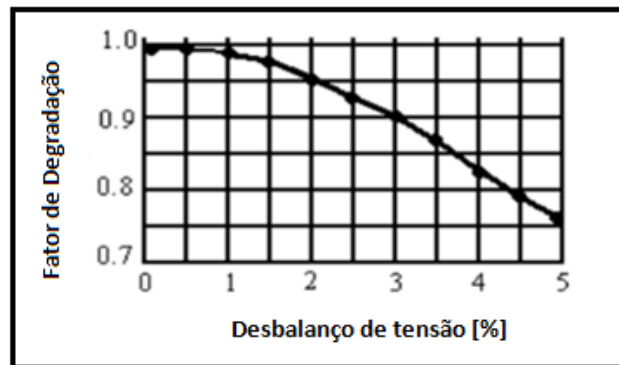


Figura 3.12 - Fator de degradação

b) Qualidade da energia

Para avaliar a qualidade de energia, usam-se as informações das tensões e correntes no domínio do tempo, o gráfico de barras dos harmônicos além da distorção total harmônica (THD) e os fatores de degradação da NEMA baseado no fator de tensão harmônico (HVF).

Alto valor de THD, causado principalmente por cargas não lineares conectadas ao sistema, aumentam as perdas elétricas que causam novamente aumento de temperatura e diminuem a eficiência do motor.

O fator de degradação recomendado pela NEMA é utilizado para avaliar o conteúdo harmônico medido e auxiliar na análise dos resultados da mesma forma que é feito na análise anterior com o fator de degradação.

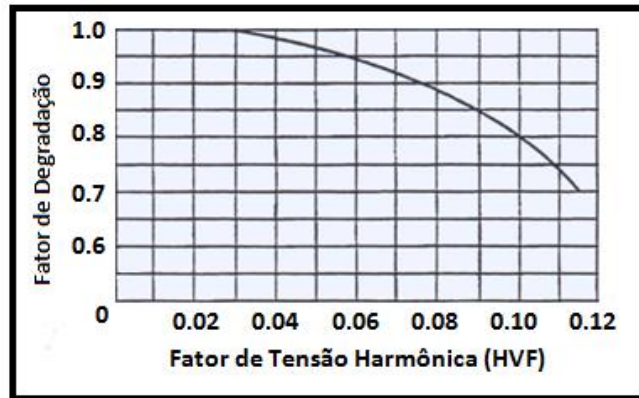


Figura 3.13 - Fator de tensão harmônica

Para avaliar os valores de THD a norma IEEE 519-1992 fornece os valores limites para diversos casos. Para motores alimentados até 600 Volts a tabela para os limites de THD de tensão pode ser observada a baixo.

Tabela 3.5 - Limite de THD segundo IEEE 519-1992

	Aplicações especiais	Aplicações Gerais	Sistemas dedicados
THD	3%	5%	10%

c) Estator

A análise da zona de falha do estator é feita através dos resultados das indutâncias de cada fase, porcentagem de desequilíbrio de impedâncias e os fatores de potência.

Avárias no estator como, por exemplo, curto entre espiras, causam da mesma forma que problemas na qualidade de energia, desequilíbrios de corrente, porém, a diferença com problemas de altas resistências na conexão é que falhas no estator causam também mudanças nos ângulos entre as tensões e correntes e é então possível utilizar os fatores de potência para a análise da avaria.

O valor do desbalanço das impedâncias ajuda também a tirar a conclusão se o desbalanço das correntes é causado por falha no estator ou por altas resistências nas conexões.

Além disso, a relação entre o desbalanço entre as correntes e o desbalanço das impedâncias pode servir como indicativo de avarias no isolamento da máquina.

3.4.3 Eccentricity

Nesse ensaio obtém-se o espectro de frequência para as correntes das 3 fases do motor com o intuito de se detectar problemas no entreferro do mesmo, sendo que a aquisição é feita com resolução adequada e em uma faixa de frequências que atende aos requisitos para a detecção dessa avaria.

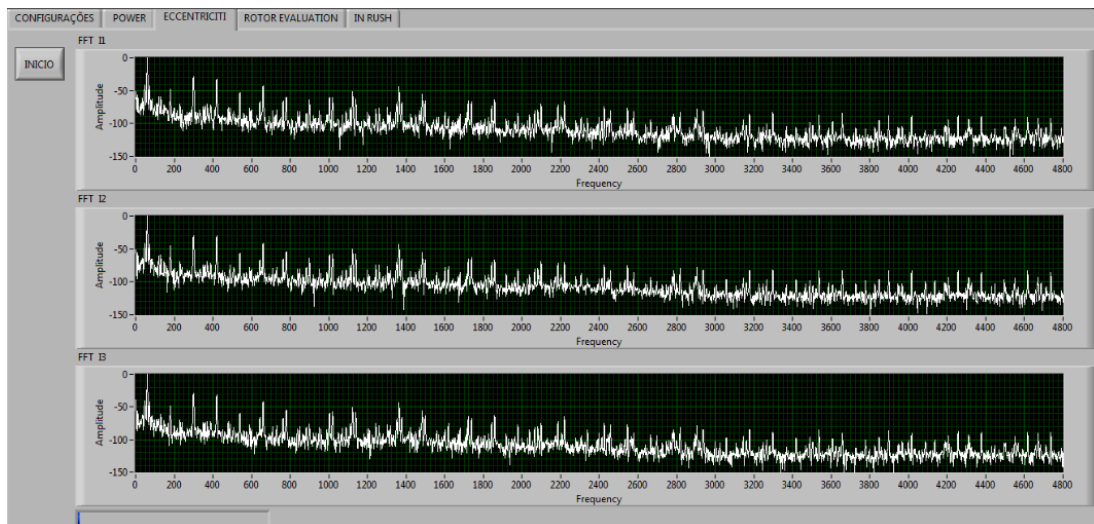


Figura 3.14 - Tela do ensaio Eccentricity do software desenvolvido

A análise dos resultados pode ser feita através dos métodos indicados em **2.3**

3.4.4 Rotor evaluation

Nesse ensaio obtém-se o espectro de frequência para as correntes das 3 fases do motor com o intuito de se detectar problemas no rotor como, por exemplo, barras ou anéis de curto quebrados, sendo que a aquisição é feita com resolução adequada e em uma faixa de frequências que atende às necessidades para a detecção da avaria específica.

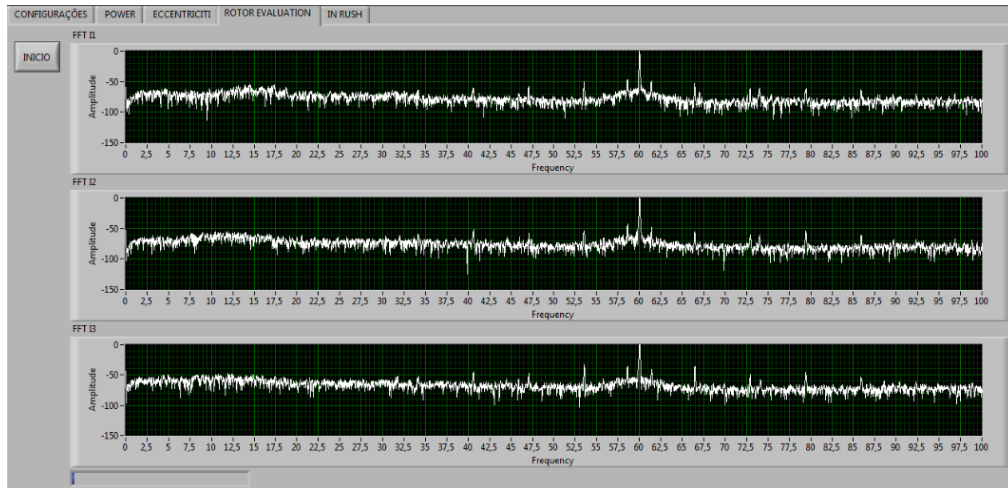


Figura 3.15 - Tela do ensaio Rotor Evaluation do software desenvolvido

A análise dos resultados pode ser feita através dos métodos indicados em 2.3

3.4.5 In rush

É o teste de partida da máquina onde são aquisitadas as 3 correntes de alimentação do motor com o intuito de avaliar o rotor do mesmo.

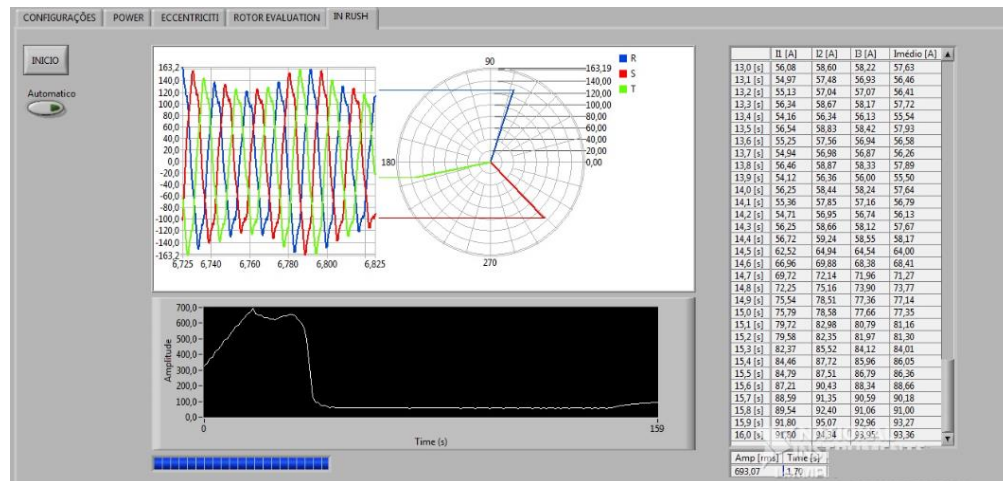


Figura 3.16 - Tela do ensaio In Rush do software desenvolvido

Além do gráfico de partida da máquina, o software também calcula o tempo de partida e a corrente máxima atingida, sendo que ensaio pode ser realizado de maneira automática, onde o software inicia a aquisição dos dados após a partida do motor, ou manual onde o operador deve clicar no botão início quando desejar que a aquisição comece. A análise dos resultados pode ser feita através dos métodos indicados em 2.3.

3.5 Software de análise

O software de análise foi desenvolvido para que as informações pudessem ser usadas adequadamente na análise de falhas em motores de indução.

O procedimento de envio de dados é bem simples bastando que o usuário selecione o arquivo gerado pelo equipamento que o software de análise plota todos os espectros e valores importantes obtidos pelos ensaios.

É importante observar que existe um conjunto de técnicas que podem ser fornecidas simultaneamente na análise de máquinas elétricas, assim, os resultados de ESA podem ser usados juntamente com análise de vibração, termografia, análise de óleo, ultrassom etc garantindo um laudo muito preciso sobre a situação do equipamento.

As telas do software analisador seguem o modelo dos ensaios realizados pelo equipamento, portanto é subdividido praticamente nas mesmas seções.

3.5.1 Power

Nessa tela é possível obter as informações sobre o desempenho da máquina através das tabelas das Figuras 3.17, 3.21 e 3.22, além do diagrama fasorial Figura 3.18, gráfico de barras dos harmônicos Figura 3.19, ondas no tempo Figura 3.20 e algumas informações sobre as características nominais e construtivas da máquina Figura 3.22.



Figura 3.17 - Tela Banco Power do software de análise



Figura 3.18 - Tela Diagrama Fasorial do software de análise



Figura 3.19 - Tela Gráfico de Barras de Harmônics do software de análise



Figura 3.20 - Tela Ondas no tempo do software de análise

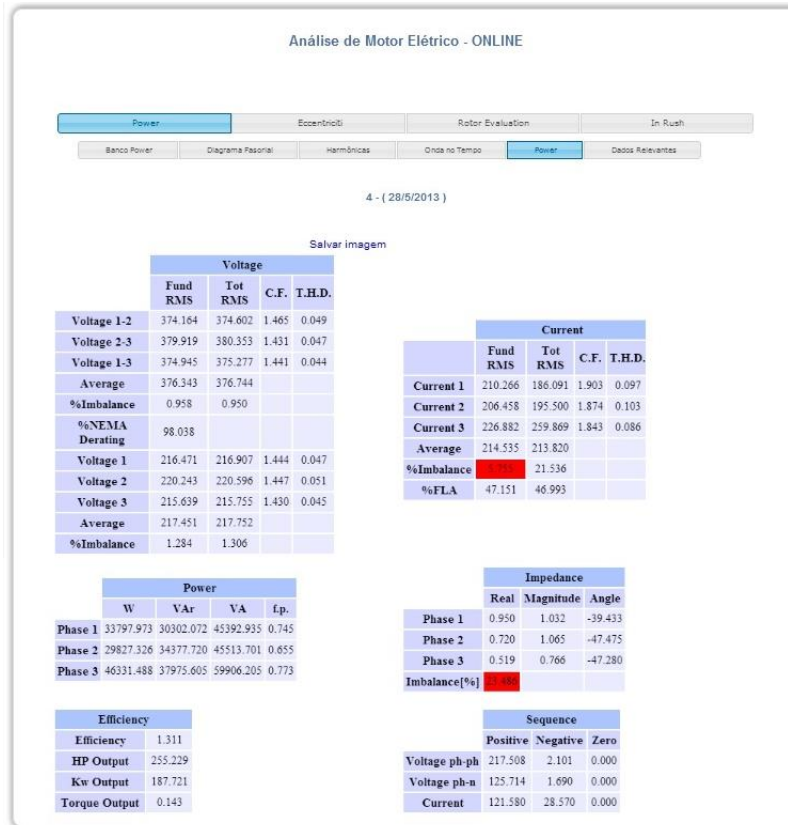


Figura 3.21 - Tela Power do software de análise

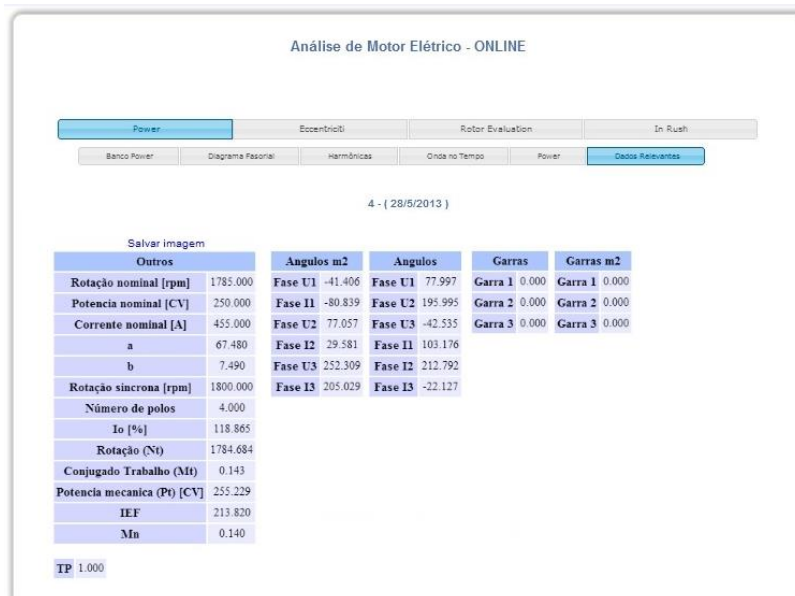


Figura 3.22 - Tela Dados Relevantes do software de análise

O software alerta alguns resultados nas tabelas quando esses assumem valores críticos, além disso, todos os gráficos possuem funções como barra de rolagem, zoom e opções para selecionar quais fases de corrente e tensão querem ser observadas. No gráfico de barras dos harmônicos pode-se ainda selecionar qual faixa das harmônicas quer ser observada.

Pelo diagrama fasorial e através da tela “Dados relevantes” é possível observar se os ensaios foram realizados com algum tipo de inversão nos sensores e, caso isso tenha ocorrido, pode-se utilizar o software comentado na seção 3.5 para re-processar os sinais, além disso, todos os gráficos e tabelas podem ser salvos em vários formatos de arquivo para serem usados no relatório sobre a condição da máquina.

3.5.2 Eccentricity

Essa tela possui as funções de zoom e de seleção de quais fases de corrente querem ser analisadas, além disso, existem as ferramentas de cursor de harmônicas e a opção de remover as harmônicas da frequência fundamental para facilitar a análise.



Figura 3.23 - Tela Eccentricity do software de análise

3.5.3 Rotor Evaluation

Possui as mesmas ferramentas comentadas anteriormente, além de uma ferramenta onde pode-se selecionar a faixa de frequências que se deseja analisar no espectro.



Figura 3.24 - Tela Rotor Evaluation do software de análise

3.5.4 In rush

Além de poder visualizar a curva da corrente de partida do motor com as mesmas ferramentas anteriores, os valores da máxima corrente e tempo de partida são disponibilizados na tabela que está na figura 3.25.



Figura 3.25 - Tela In Rush do software de análise

3.6 Software de reprocessamento do sinal

O software de reprocessamento foi desenvolvido também em LabView pelas mesmas vantagens mencionadas anteriormente e é utilizado apenas pelo analista pois apenas esse têm conhecimento técnico necessário para utilizá-lo e para dar agilidade aos ensaios realizados em campo, sendo capaz de reprocessar os resultados obtidos e disponibilizá-los novamente para análise quando apresentarem indícios de que os sensores foram colocados de maneira errada no motor durante os ensaios.

Nesse caso o arquivo recebido pelo analista é inserido como dado de entrada no software de reprocessamento assim que este é executado.

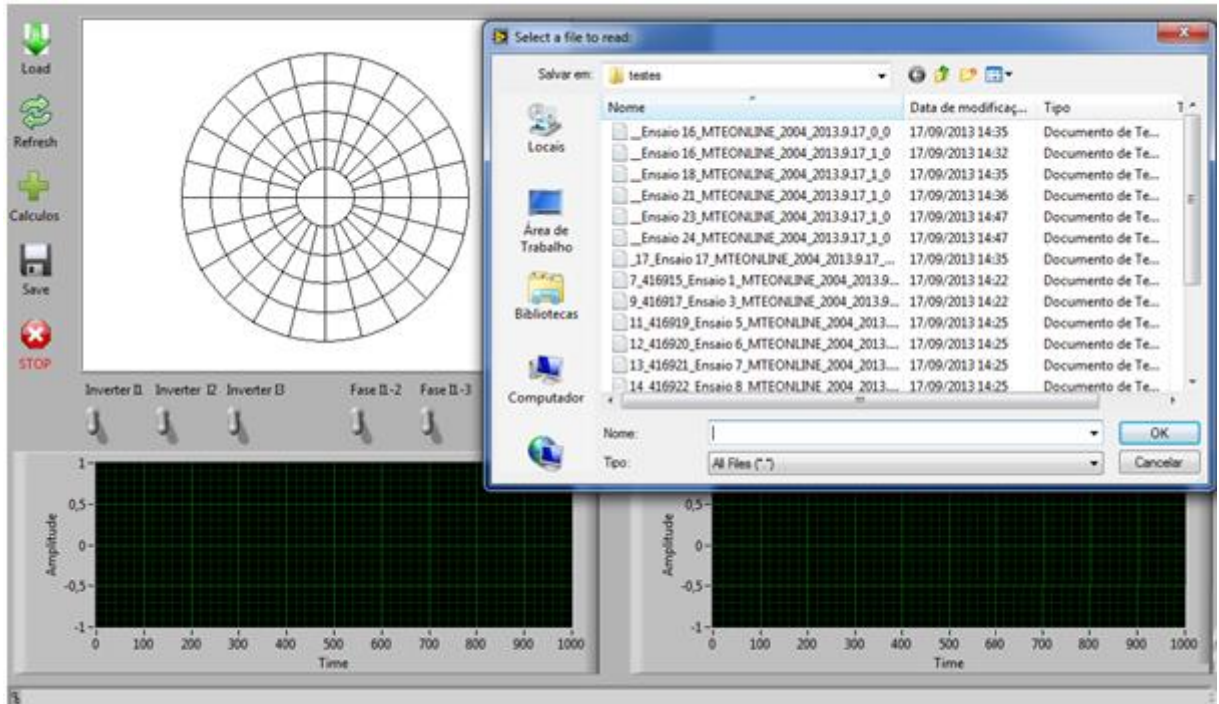


Figura 3.26 - Seleção do arquivo no software de reprocessamento de sinal

O software plota novamente as formas de onda e o diagrama fasorial medidos, além de alguns valores calculados que sofrem influencia da má conexão dos sensores com isso, o analista pode observar qual procedimento deve ser adotado para que os vetores correspondam à situação ideal onde as fases de corrente e tensão estejam devidamente posicionadas.

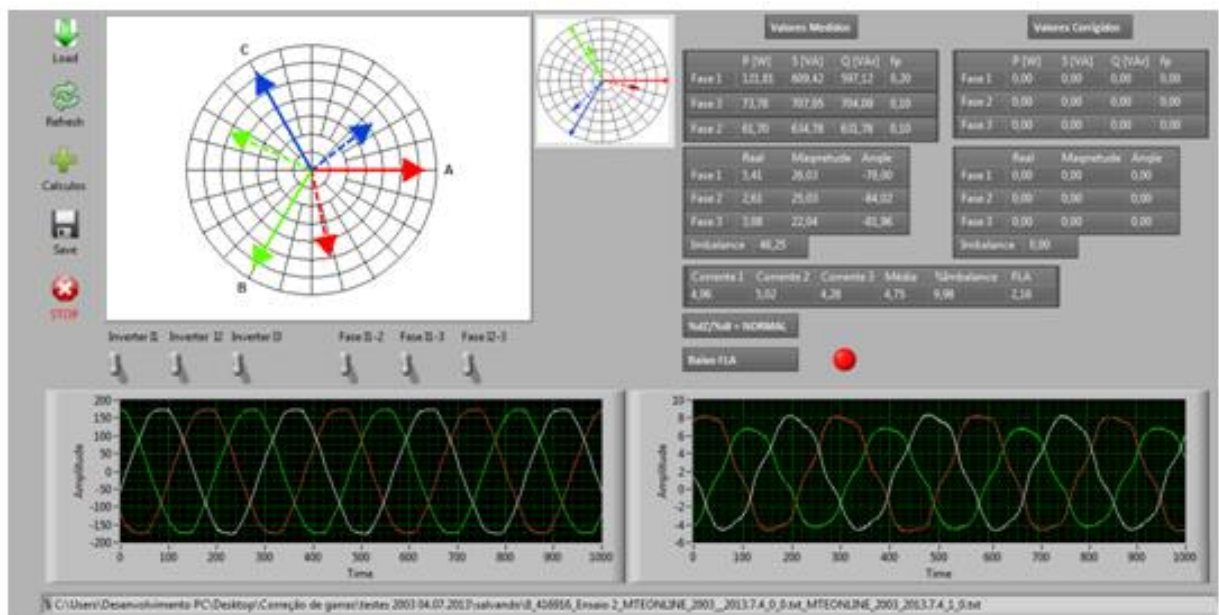


Figura 3.27 - Tela inicial do software de reprocessamento de sinal

Para que o analista possa fazer a correção o software disponibiliza as opções de trocar as garras de corrente entre si ou invertê-las. Na figura abaixo, pode-se observar que os vetores correspondentes a corrente da fase A e C estão trocados.

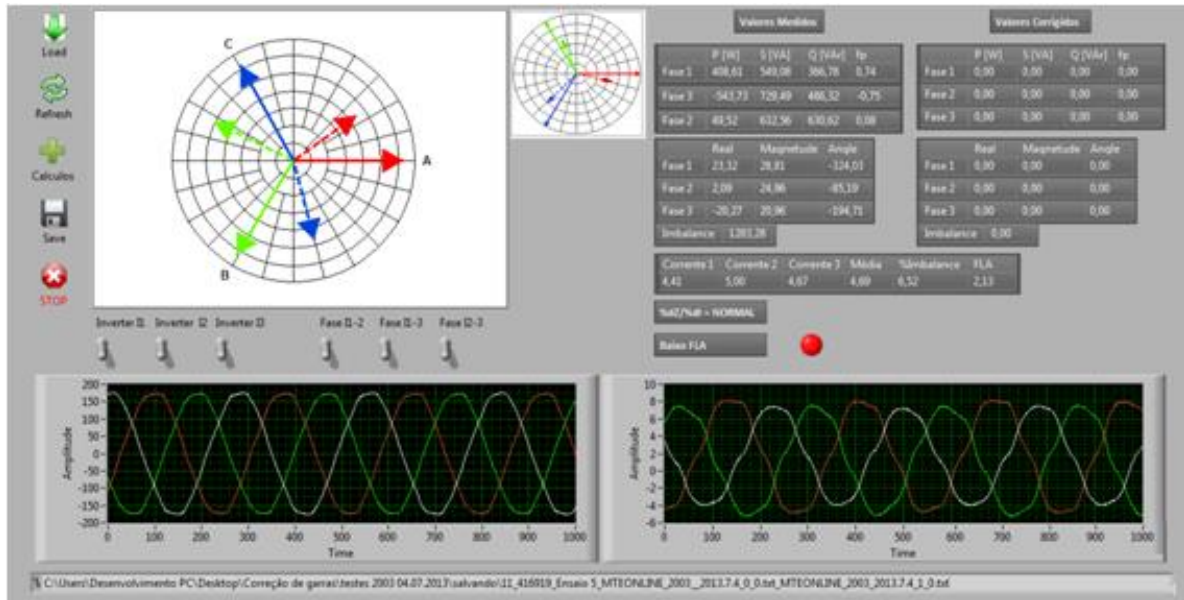


Figura 3.28 - Software de reprocessamento de sinal – Fases trocadas

O analista pode observar a inversão das fases e corrigi-las:

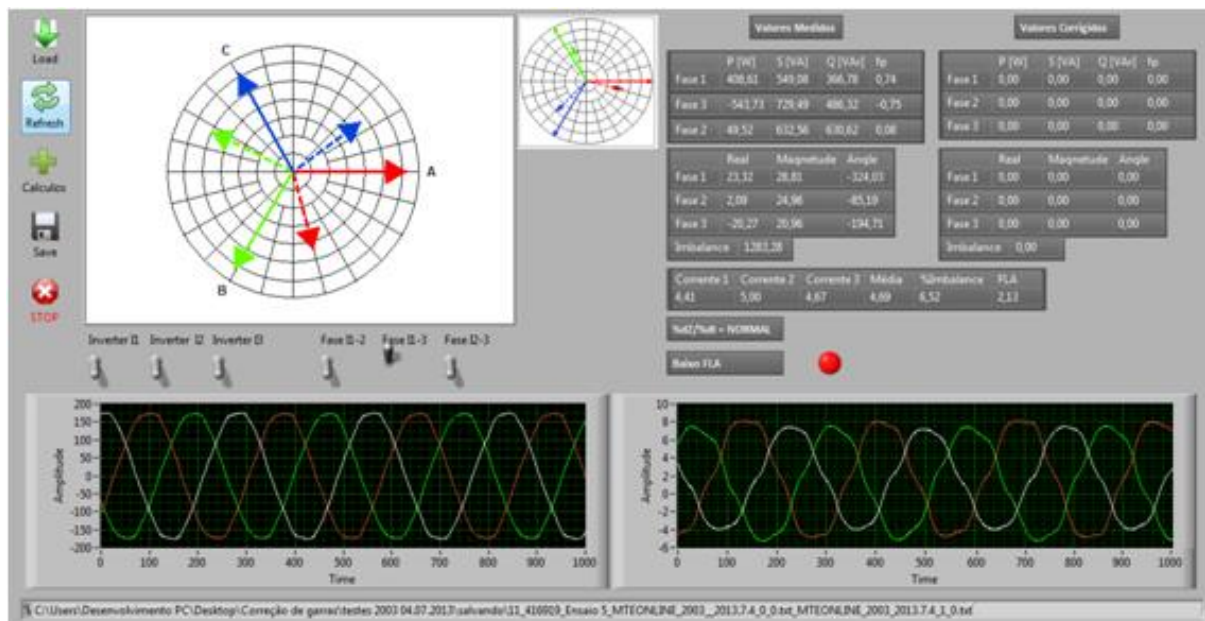


Figura 3.29 - Software de reprocessamento de sinal – Fases corrigidas

O exemplo seguinte ilustra a situação da corrente da fase A ter sido posicionada no sentido contrário e as correntes das fases 2 e 3 serem trocadas:

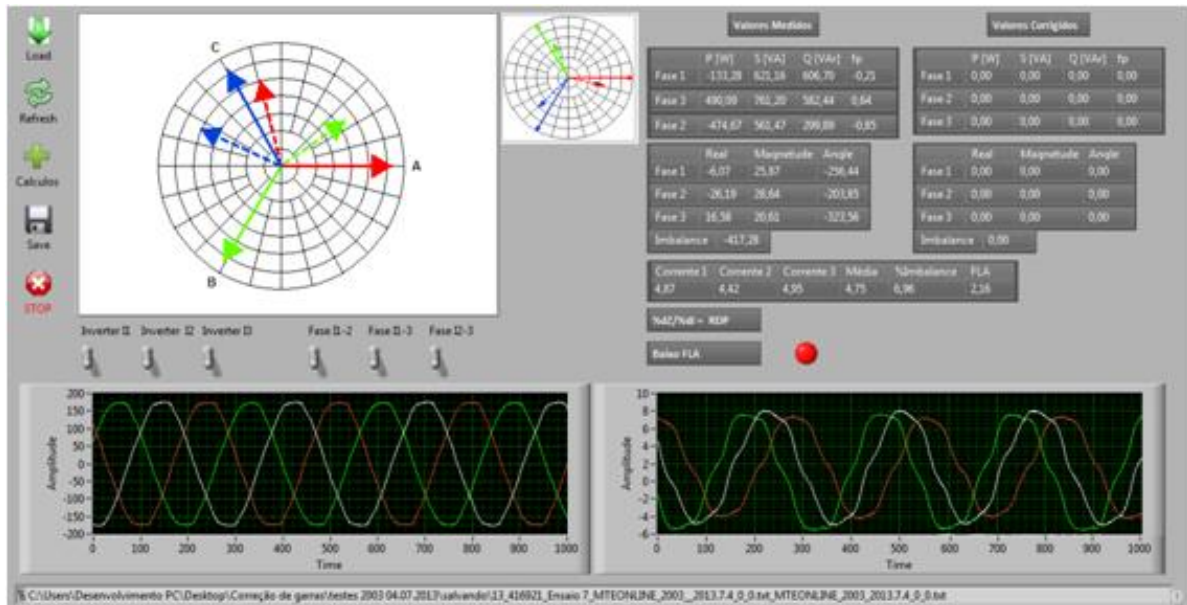


Figura 3.30 - Software de reprocessamento de sinal – Fase invertida

Após a correção observa-se novamente o diagrama fasorial correto:

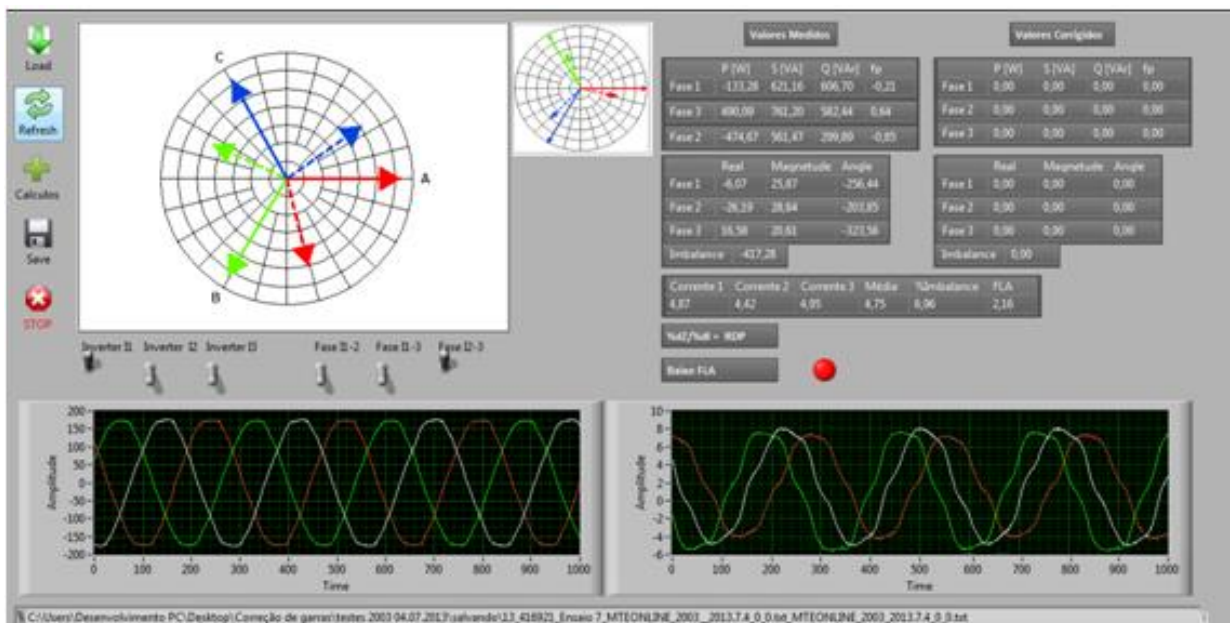


Figura 3.31 - Software de reprocessamento de sinal – Fase corrigida

O software permite que o usuário troque ou inverta quantas vezes necessárias os vetores até que seja obtido a sequência correta no diagrama fasorial e após isso o analista libera o software para refazer os cálculos necessários. O software reprocessa os dados e permite que o usuário salve o arquivo corrigido disponibilizando-o para a análise correta das informações.

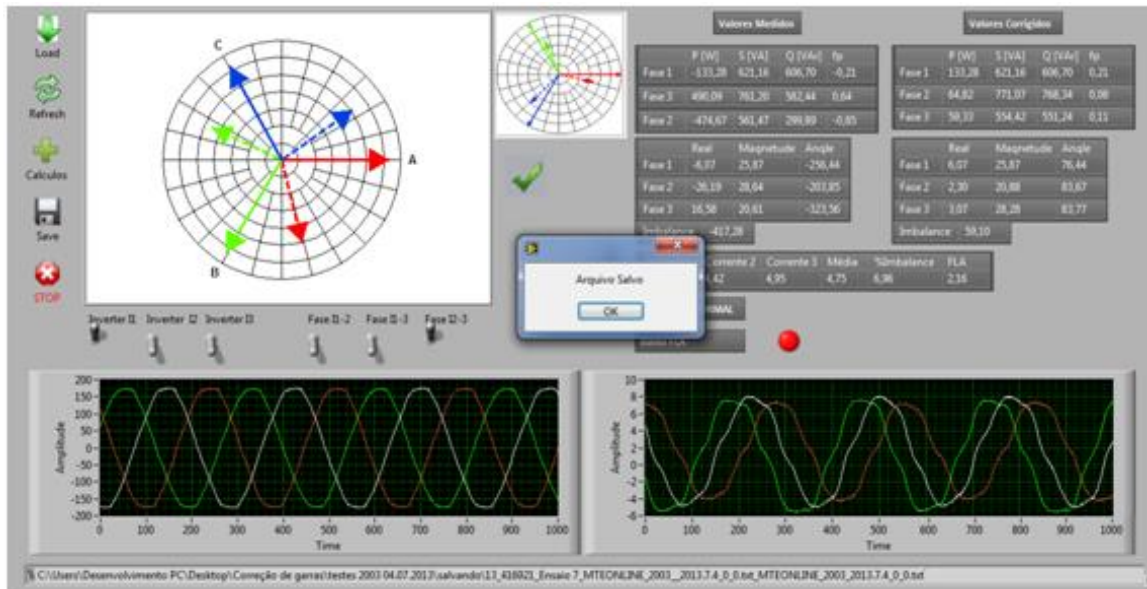


Figura 3.32 - Software de reprocessamento de sinal – Arquivo Salvo

O software é capaz de reconhecer quando os vetores não estão corretamente posicionados no diagrama fasorial e impedir que o analista termine a análise e salve os resultados nessa situação:

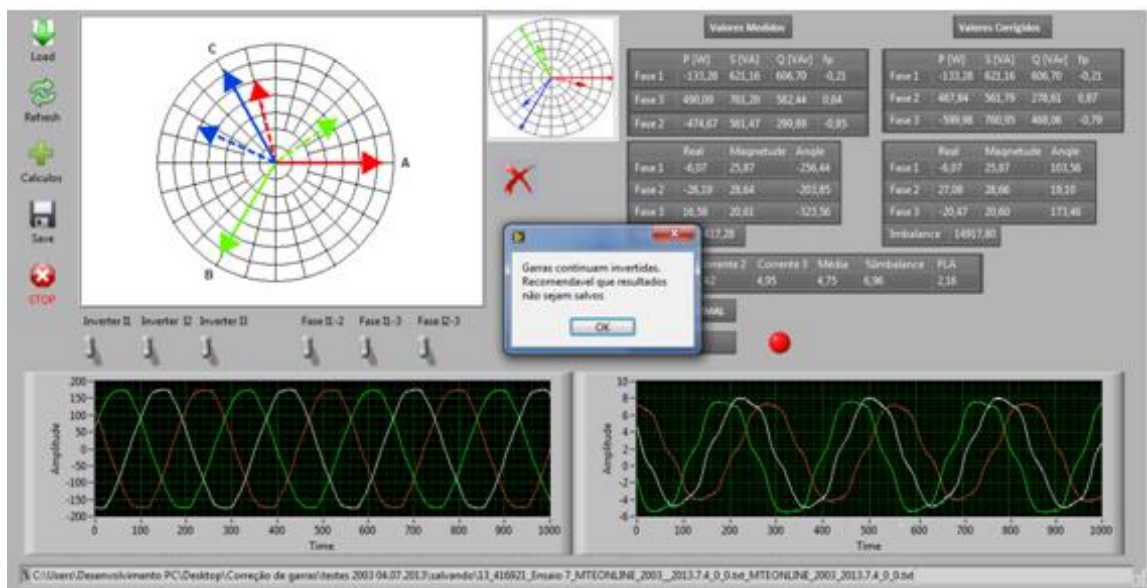


Figura 3.33 - Software de reprocessamento de sinal – Mensagem de erro

4. Bancada experimental e Resultados

4.1 Montagem da bancada experimental

Nesta capítulo será discutido a bancada experimental montada para a realização do desenvolvimento, ensaios comprobatórios e calibração do equipamento.

A bancada utilizada para o desenvolvimento e calibração é composta por um motor de indução trifásico acoplado a um motor de corrente contínua, um banco de resistores, varivolt trifásico além do equipamento desenvolvido e instrumentos de medição para a comparação com os valores aquisitados.

O motor de corrente contínua funciona como gerador alimentando o banco de resistências e atuando como carga para o motor de indução, variado sua corrente de excitação do campo ou alterando o banco de resistências varia-se a carga no motor. Na Figura 4.1 tem-se uma foto do conjunto de motores utilizado:

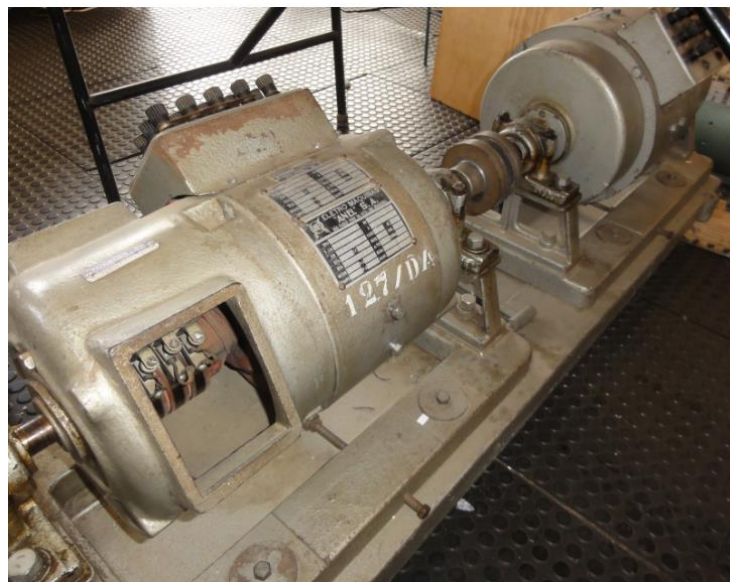


Figura 4.1 - Bancada de desenvolvimento e calibração

A Figura 4.2 ilustra o esquema elétrico das ligações feitas para o desenvolvimento e calibração do equipamento através do conjunto MIT + MCC.

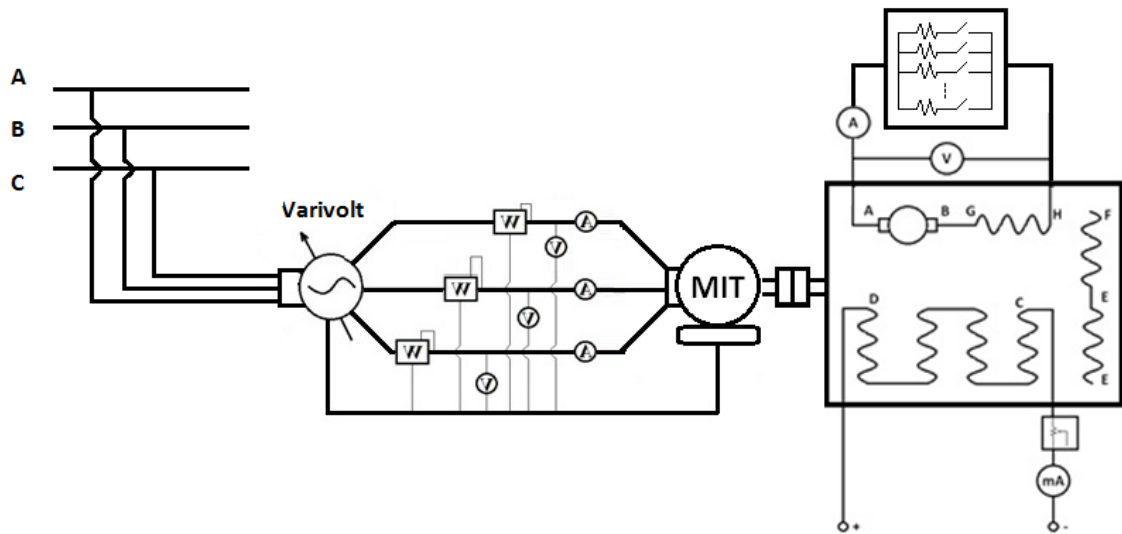


Figura 4.2 - Esquema elétrico das ligações

Os dados nominais dos motores do conjunto são indicados na Tabela 4.1

Tabela 4.1 - Dados nominais dos motores da bancada

Motor de Indução		Motor de Corrente Contínua	
Potência Nominal	1,86 KW	Potência Nominal	1,7 KW
Tensão Nominal	220/380 V	Tensão Nominal de armadura	220 V
Corrente Nominal	7,5/4,3 A	Corrente Nominal de armadura	7,7 A
Rendimento	81%	Rotação nominal	1500
Rotação nominal	1410	Classe de Isolação	A
Classe de Isolação	A	Campo	MAX V-A 0,6
f.p	0,82		
Frêquencia	50 Hz		

Os instrumentos utilizados para medição, calibração e comparação com os resultados obtidos pelo equipamento são descritos a seguir:

- a) **Multímetros para a medição das tensões de alimentação da máquina: Minipa ET-2110**



Figura 4.3 – Instrumento para medição de tensão

- b) **Amperímetros para medição das correntes de alimentação da máquina: SWE AC/DC Clamp Meter 3800 CL**



Figura 4.4 – Instrumento para medição de corrente

- c) **Wattímetros para medição das potências: Minipa MRYMEN ET-4090**



Figura 4.5 – Instrumento para medição das potências

d) Tacômetro para medição da rotação: SL Selim DT-2235^a



Figura 4.6 - Instrumento para medição da rotação

e) Freqüencímetro

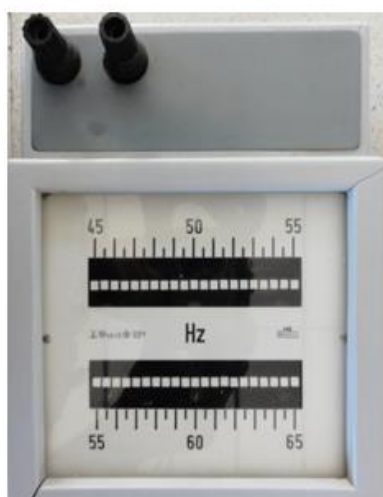


Figura 4.7 - Instrumento para medição da frequência

Foram utilizados também modelos de voltímetros, amperímetros e wattímetros analógicos para que os dados pudessem ser confrontados, mas como os resultados obtidos não sofreram grandes variações, apenas as versões digitais foram comentadas aqui.

Um diagrama resumido com as conexões do equipamento ao motor e dos instrumentos de medida utilizados pode ser visto na Figura 4.8

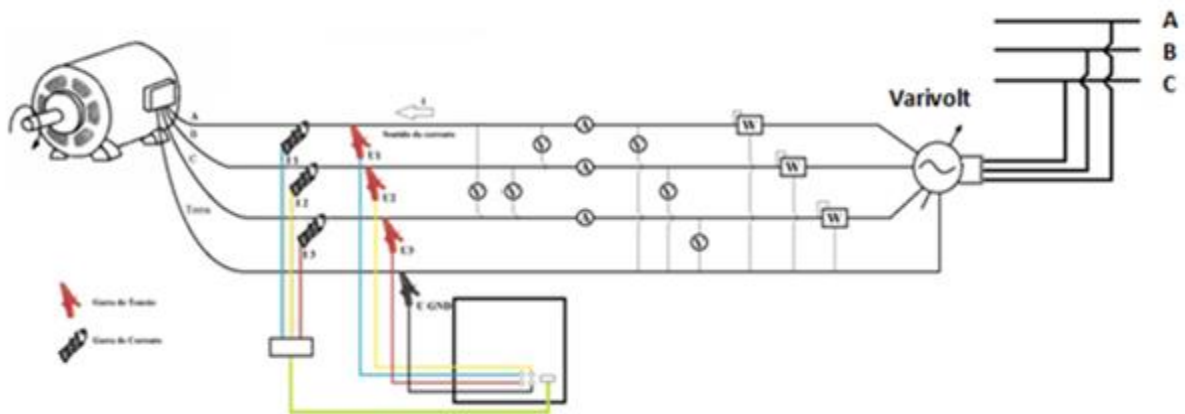


Figura 4.8 - Esquema elétrico montado

Esse diagrama não representa a carga aplicada ao motor de indução através do motor de corrente contínua nem o banco de resistores.

Além dessa bancada utilizada para o desenvolvimento e calibração do equipamento, foi utilizada outra composta por um Módulo de freio da WEG do tipo Foucault atuando como carga para alguns motores de indução trifásicos além dos mesmos instrumentos de medição citados anteriormente. Essa bancada se destina aos ensaios realizados nos motores com as avarias geradas em laboratório com a intenção de comprovar a eficácia do equipamento na detecção de tais defeitos.

As medições para avaliação de defeitos foram realizadas em 2 motores disponibilizados no laboratório. Os dados obtidos dos fabricantes para essas máquinas são indicados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Dados nominais dos motores utilizados

Potência Nominal	1,5 CV/ 1,1 KW	Potência Nominal	1 CV/ 0,75 KW
Tensão Nominal	220/380/440 [V]	Tensão Nominal	220/380/440 [V]
Corrente Nominal	4,9/2,9/2,5 [A]	Corrente Nominal	3,02/1,75/1,51 [A]
Rendimento	81,5%	Rendimento	79,5%
Rotação Nominal	1710	Rotação Nominal	1720
Ip/In	6	Ip/In	7,2
f.p	0,72	f.p	0,82
Frêquencia	60	Frêquencia	60
Barras Rotóricas	34		

Motor 1

Motor 2

Os ensaios foram realizados com e sem carga e cada motor foi submetido a uma falha específica sendo que uma medição inicial foi realizada antes das avarias serem geradas nas máquinas configurando a medição na situação onde o motor está saudável.

Os resultados para cada condição de medição e para cada avaria específica bem como o meio pelo qual as falhas experimentais foram obtidas serão comentados adiante.

4.1 Calibração

Devido às incertezas inerentes existentes em todos os componentes eletrônicos e sensores utilizados é necessário que o equipamento passe por uma calibração para garantir maior qualidade e precisão dos resultados, para isso, foram realizados ensaios para diversas situações de cargas e tensões de alimentação visando a calibração do equipamento. Os valores das tensões e correntes foram medidos utilizando os instrumentos mencionados anteriormente e comparados com os valores medidos pelo equipamento.

Os ensaios para calibração foram realizados utilizando a bancada composta pelo conjunto MIT – MCC sendo que a carga foi variada através da corrente de excitação de campo do motor de corrente contínua e alterando o banco de resistências, já a tensão de alimentação foi variada utilizando o varivolt da alimentação do motor.

Após a calibração novas medições foram realizadas e o erro máximo obtido para corrente e tensão foi de 0,92 % como pode ser observado na tabela a baixo:

Tabela 4.3 - Medição após calibração

	Medidos via instrumentação	Medidos via equipamento	Erro [%]
I1 [A]	2,15	2,17	0,92
I2 [A]	2,38	2,38	0,00
I3 [A]	2,40	2,42	0,83
U1 [V]	118,9	118,5	0,33
U2 [V]	121,0	121,7	0,54
U3 [V]	120,4	119,3	0,92

Outra medida importante nos ensaios de MCSA é o ângulo entre as tensões e correntes, assim a eletrônica foi testada utilizando um gerador de sinais garantindo que esses valores são aquisitados corretamente. A tabela 4.4 mostras os resultados para os ângulos medidos em graus para cada uma das fases para diversas defasagens simuladas pelo gerador de sinais.

Tabela 4.4 - Medição dos ângulos

Gerador	Valores medidos			
	Fase 1 [°]	Fase 2 [°]	Fase 3 [°]	Erro [%]
10°	10	10	10	0,00
20°	20	20	20	0,00
30°	30,01	30	30	0,03
40°	40	39,99	40	0,02
50°	50	49,99	49,99	0,02
60°	60	59,99	59,99	0,02
70°	70	69,99	69,99	0,01
80°	80	79,99	79,98	0,01
90°	90	89,99	89,99	0,01
120°	120	119,99	119,99	0,01
180°	180	180	180	0,00
270°	270	270,02	270,02	0,01

4.3 Falhas geradas em laboratório

Algumas avarias foram criadas experimentalmente a fim de validar os resultados obtidos pelo equipamento e nessa seção serão comentados brevemente os métodos pelos quais elas foram obtidas.

Vale citar que existem outras falhas possíveis de serem detectadas pelo método da Análise da Assinatura Elétrica que não serão geradas nesse trabalho sendo que a avaliação para esses outros casos depende exclusivamente da análise correta dos dados obtidos pelo equipamento. Para garantir que tais informações possam ser estudadas, o equipamento armazena não só os resultados mostrados em tela e fornecidos no software de análise, mas salva também as ondas no tempo e espectros de frequências em diferentes configurações de aquisição, permitindo que qualquer processamento de sinal ou análise possam ser realizados. As avarias geradas experimentalmente aqui são assim apenas um demonstrativo do poder de detecção do equipamento sendo que não restringem a avaliação de outras falhas.

Para a realização de todos os ensaios comprobatórios foi utilizada a bancada de testes da WEG mencionada anteriormente.

4.3.1 Barras quebradas

Foram simulados casos para o Motor 1 da Tabela 4.2 com 1,2 e 3 barras quebradas. O rompimento das barras do rotor foi feito através de uma broca com diâmetro de 5 mm e a Figura 4.9 apresenta uma vista do rotor após a geração da falha.



Figura 4.9 - Rotor com barras quebradas

Os ensaios foram realizados com e sem a aplicação de carga no motor, antes e depois da geração das avarias progressivamente.

4.3.2 Desbalanço de tensão

Para gerar um desbalanço de tensão um banco de resistores foi inserido em uma das fases de alimentação do motor como indicado na Figura 4.10:

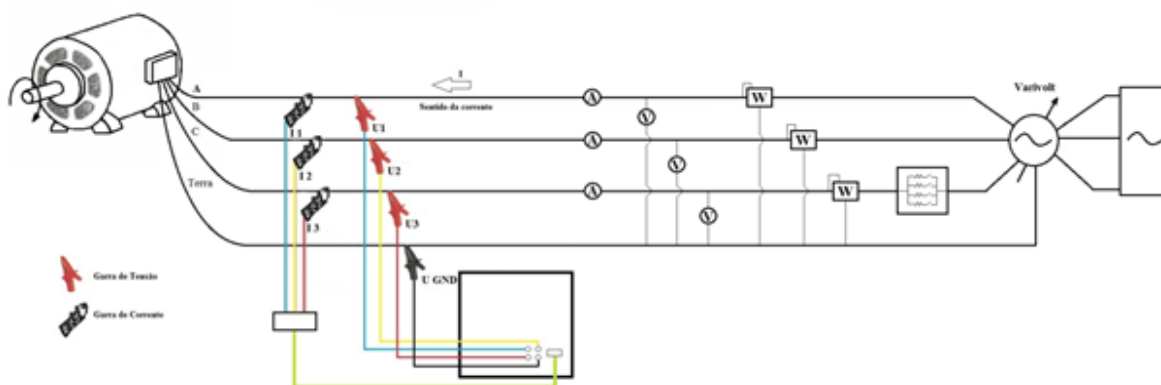


Figura 4.10 - Esquema elétrico montado para simular desbalanço na alimentação

O banco de resistores consiste em 6 resistências que são inseridas em uma das fases de alimentação da máquina, fazendo com que a tensão que chegue a essa fase seja menor que as demais. Para aumentar ou diminuir o desbalanço, basta chavear os resistores, aumentando ou diminuindo a tensão que alimenta o motor.



Figura 4.11 - Banco de resistores

Os ensaios foram realizados no Motor 2 da Tabela 4.2 com e sem a aplicação de carga, antes e depois da geração do desbalanço.

4.3.3 Curto entre espiras

Foi gerado um curto entre as espiras do estator do Motor 2 da Tabela 4.2 através da raspagem do isolamento das espiras e posterior solda curto-circuitando tais enrolamentos.

A Figura 4.12 mostra uma foto da avaria gerada.



Figura 4.12 - Motor com curto entre espiras

O curto gerado nessa máquina foi de aproximadamente 30% e os ensaios foram realizados com e sem a aplicação de carga no motor, antes e depois da geração das avarias progressivamente.

4.4 Resultados obtidos

A seguir serão demonstrados alguns dos resultados obtidos na bancada experimental para as diferentes falhas comentadas e alguns casos práticos de medições realizadas em campo nos últimos meses.

4.4.1 Resultados obtidos em laboratório

a) Resultados para barras quebradas

Os resultados apresentados a seguir são todos para a condição do motor operando sob carga, tendo em vista que essa variável influencia consideravelmente na amplitude das frequências características de falha e por consequência na análise dos resultados. Mesmo assim, foram realizados ensaios para o motor operando em vazio e os resultados obtidos foram condizentes com estudos realizados anteriormente demonstrando a dificuldade em se avaliar certas avarias nessas condições.

i) Medição realizada antes da aplicação das avarias:

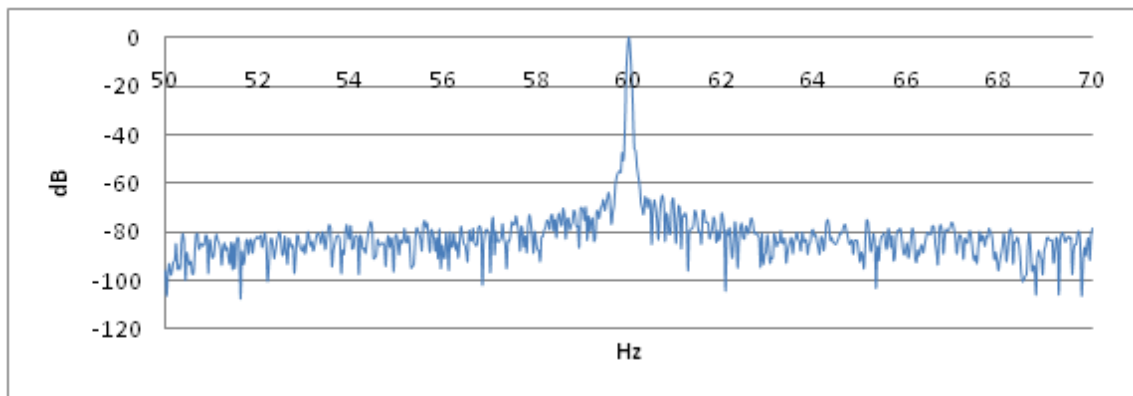


Figura 4.13 - Resultado da medição do motor saudável

Observação da inexistência do efeito redemoinho

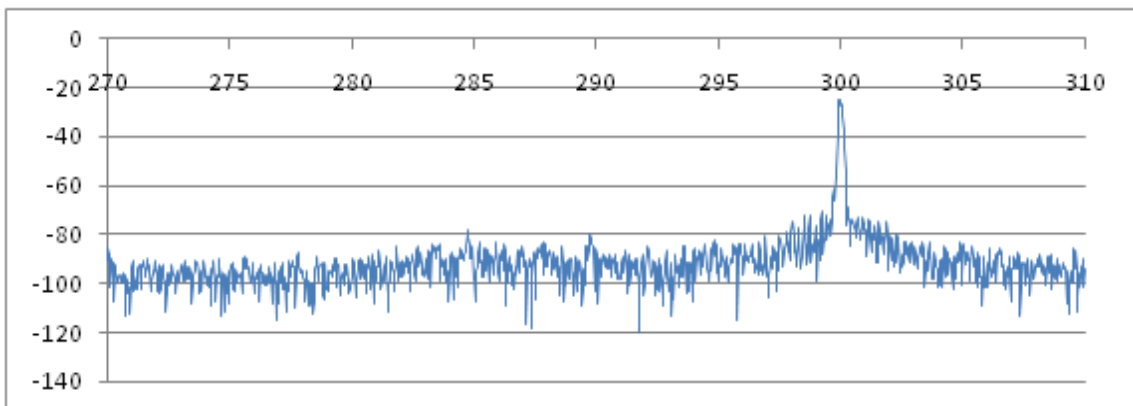


Figura 4.14 - Efeito redemoinho para motor saudável

ii) **Medição realizada com uma barra trincada:**

Para o motor ensaiado as frequências características de falha esperadas são: $F_{cc} = 55,8$ e $64,2$

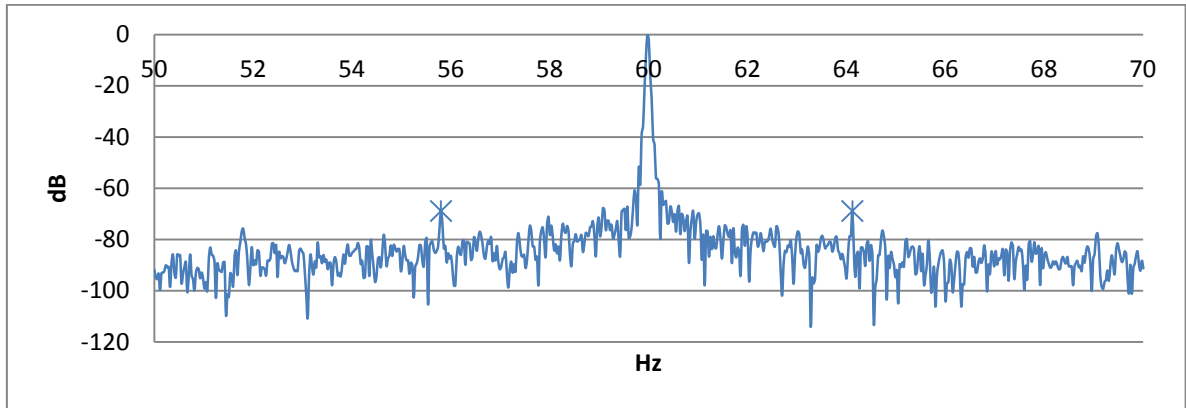


Figura 4.15 - Resultado da medição do motor com 1 barra quebrada

Observação do efeito redemoinho

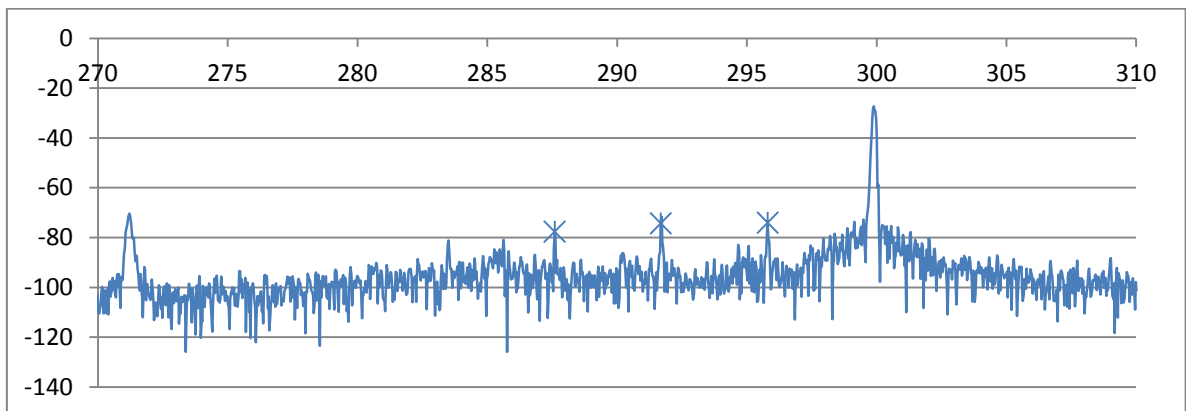


Figura 4.16 - Efeito redemoinho do motor com 1 barra quebrada

iii) **Medição realizada com duas barras trincadas:**

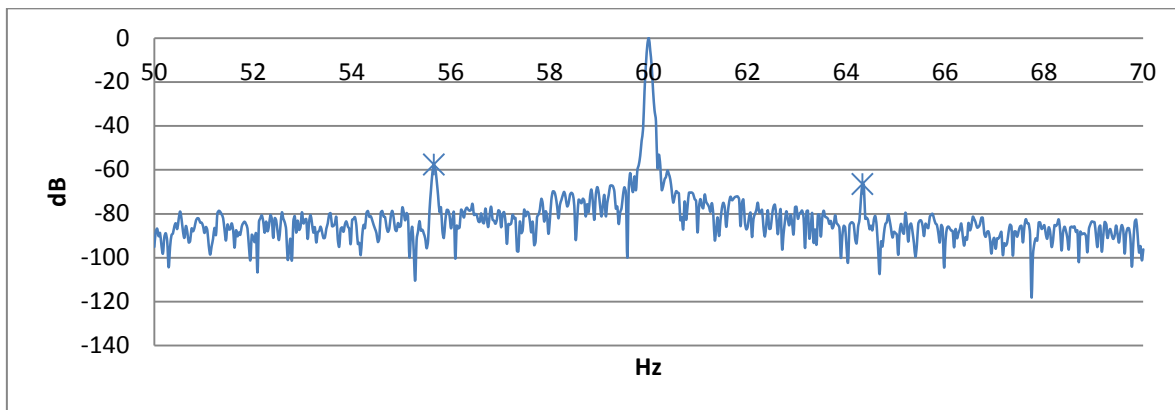


Figura 4.17 - Resultado da medição do motor com 2 barras quebradas

Observação do efeito redemoinho:

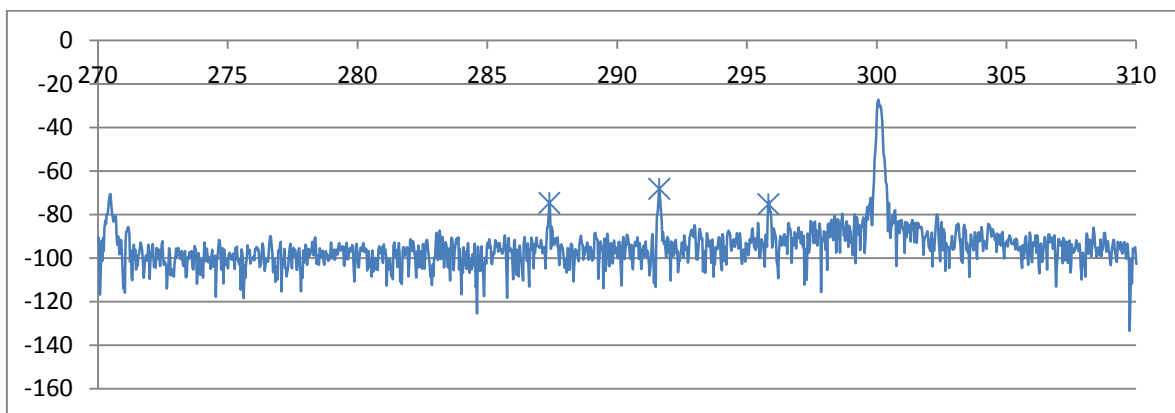


Figura 4.18 - Efeito redemoinho do motor com 2 barras quebradas

iv) **Medição realizada com três barras trincadas:**

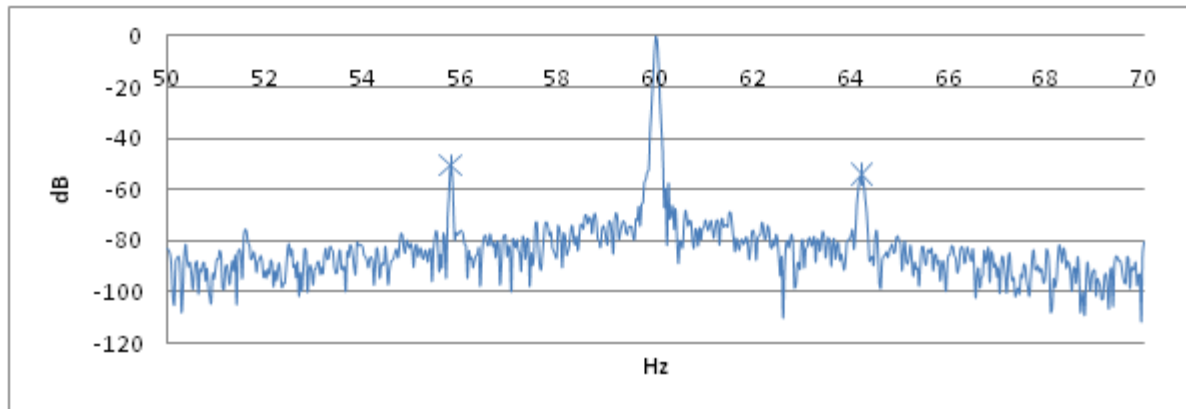


Figura 4.19 - Resultado da medição do motor com 3 barras quebradas

Observação do efeito redemoinho:

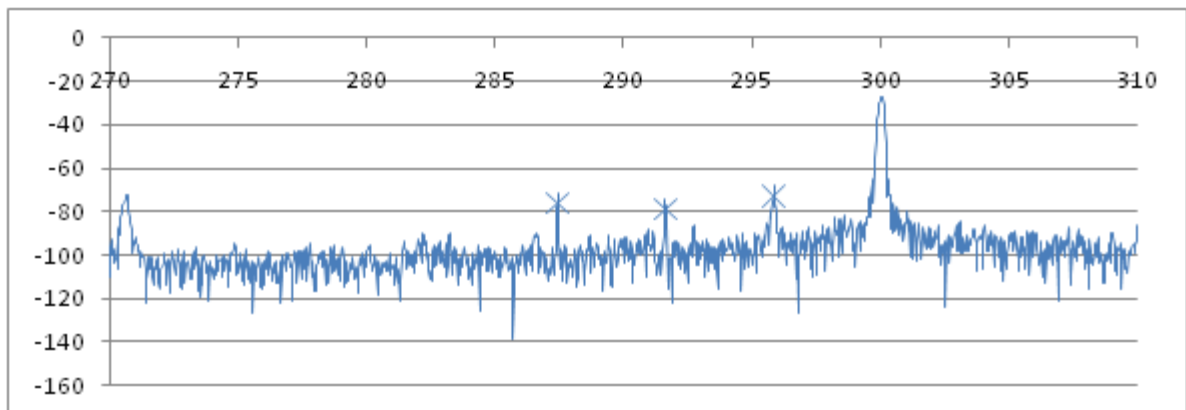


Figura 4.20 - Efeito redemoinho do motor com 3 barras quebradas

A Tabela 4.5 mostra um resumo dos resultados obtidos

Tabela 4.5 - Resumo dos resultados obtidos

Número de barras quebradas	Amplitude Frequência de falha [dB]	Efeito remoinho
0	Não observado	Não observado
1	-68,89	Observado
2	-56,21	Observado
3	-50,55	Observado

Pode-se observar a eficiência de técnica e do equipamento para a detecção de barras quebradas em motores de indução e que a gravidade da falha pode ser estimada observando as amplitudes das bandas laterais utilizadas na análise.

b) Resultados para desequilíbrio de tensão

As medições podem facilmente detectar desbalanços da tensão de alimentação através da leitura direta desses sinais, ou de sua influência nas impedâncias calculadas da máquina por exemplo.

Alguns resultados obtidos vêm resumidos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Motor com alimentação a) balanceada b) desbalanceada

Tensão 1 [V]	126,23	Tensão 1 [V]	127,4
Tensão 2 [V]	124,99	Tensão 2 [V]	124,84
Tensão 3 [V]	122,97	Tensão 3 [V]	105,64
Média [V]	124,73	Média [V]	119,29
Desbalanço [%]	1,41	Desbalanço [%]	11,44
Corrente 1 [A]	2,78	Corrente 1 [A]	2,73
Corrente 2 [A]	2,6	Corrente 2 [A]	3,17
Corrente 3 [A]	2,26	Corrente 3 [A]	0,95
Média [A]	2,55	Média [A]	2,28
Desbalanço [%]	11,2	Desbalanço [%]	58,6
	Impedância		Impedância
Fase 1	25,88	Fase 1	4,63
Fase 2	33,97	Fase 2	29,71
Fase 3	31,47	Fase 3	80,99
Desbalanço [%]	14,97	Desbalanço [%]	110,67
	(a)		(b)

Nas tabelas é possível ver o aumento significativo dos desbalanços de tensão, corrente e impedância além de poder ser visualizado a queda de tensão provocada pelo banco de resistores, assim, comprova-se a eficiência do método e do equipamento para a detecção desse e de outros problemas no circuito de alimentação da máquina.

c) Resultados para curto entre espiras

i) Medição realizada antes da aplicação das avarias:

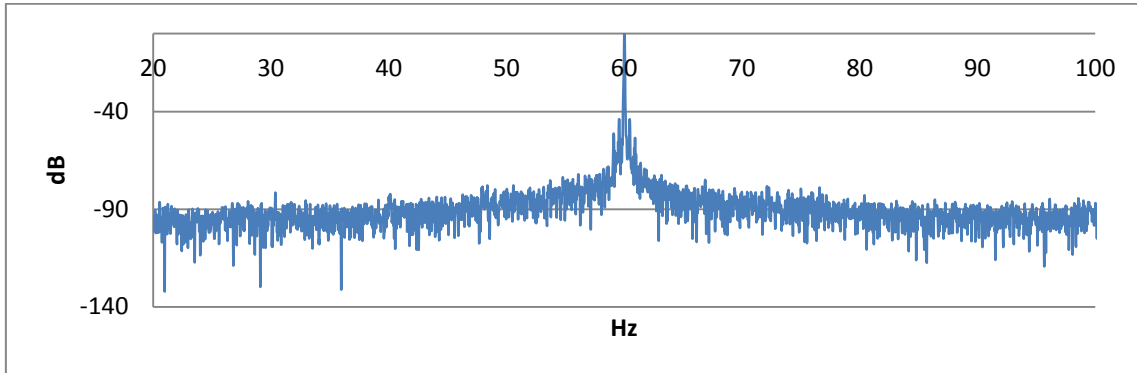


Figura 4.21 - Resultado para motor saudável

ii) Medição realizada após da aplicação da avaria:

Para o motor ensaiado as frequências características de falha esperadas são: $F_{cc} = 31,5$ e $88,5$

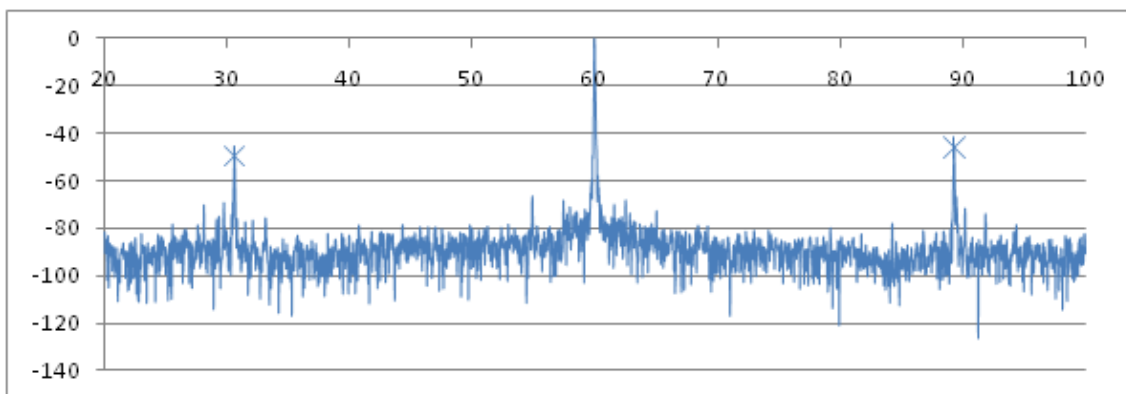


Figura 4.22 - Resultado para curto entre espiras

Pode-se observar a eficiência de técnica e do equipamento para a detecção de curto entre espiras em motores de indução através da análise das frequências características, além disso pode-se também analisar os resultados obtidos para o desbalanço de corrente e da impedância de sequência negativa que, como comentado em 2.3.5, também indicam problemas nos enrolamentos do estator.

4.4.2 Resultados obtidos em campo

i) Diagnóstico de alto índice de harmônicos

A figura 4.23 é um caso onde se constatou alto índice da 5ª harmônica na alimentação da máquina através da análise da onda no tempo da corrente e do gráfico de barras das harmônicas.

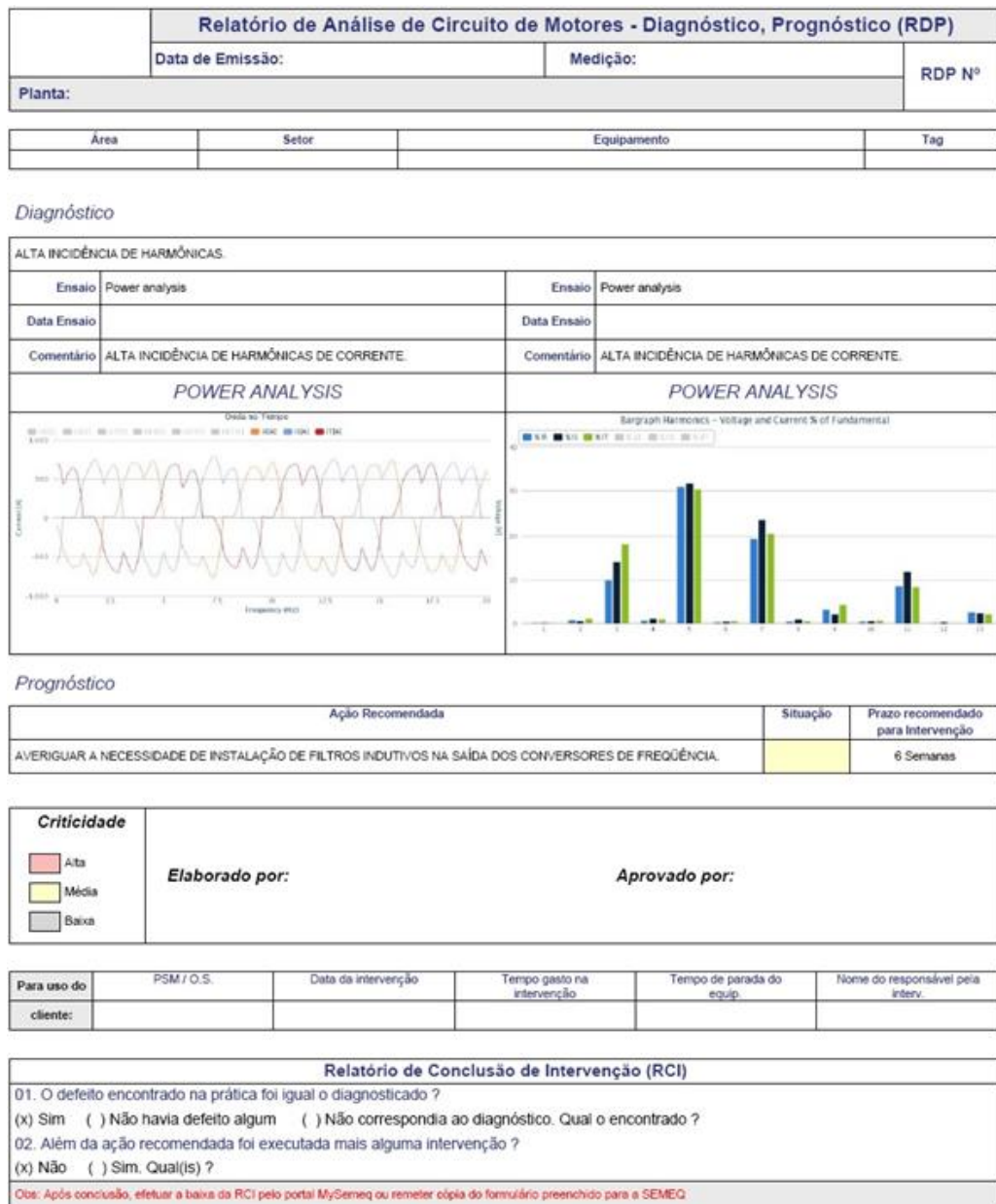


Figura 4.23 - Caso real: alto índice de harmônicos

A intervenção foi realizada após o relatório gerado e o problema foi sanado.

ii) Diagnóstico de falha no inversor

Figura 4.24 é um caso onde se constatou grande deformação na forma de onda da corrente de alimentação da máquina causada por um problema no circuito de chaveamento do inversor de frequência utilizado no acionamento do motor.

Relatório de Análise de Circuito de Motores - Diagnóstico, Prognóstico (RDP)			
Data de Emissão:		Medição:	
Planta: F. AG. CLARAS SUL			
Área	Setor	Equipamento	Tag

Diagnóstico

PORCENTAGEM DE HARMÔNICAS DE TENSÃO ACIMA DO VALOR RECOMENDADO.			
Ensaio	Power analysis	Ensaio	Power analysis
Data Ensaio		Data Ensaio	
Comentário	GRANDE DISTORÇÃO NA FORMA DE ONDA DA TENSÃO.	Comentário	ALTA INCIDÊNCIA DE HARMÔNICOS.

POWER ANALYSIS

Onda no Tempo

POWER ANALYSIS

Bargraph Harmonics - Voltage and Current % of Fundamental

Prognóstico

Ação Recomendada	Situação	Prazo recomendado para Intervenção
RECOMENDAMOS QUE SEJA REVISADO A PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR E O CIRCUITO DE DISPARO DO INVERSOR.		4 Semanas

<p>Criticidade</p> <p> Alta</p> <p> Média</p> <p> Baixa</p>	<p>Elaborado por:</p>	<p>Aprovado por:</p>
---	------------------------------	-----------------------------

Para uso do	FSM / O.S.	Data da intervenção	Tempo gasto na intervenção	Tempo de parada do equip.	Nome do responsável pela interv.
cliente:					

Relatório de Conclusão de Intervenção (RCI)	
01. O defeito encontrado na prática foi igual o diagnosticado ? (x) Sim () Não havia defeito algum () Não correspondia ao diagnóstico. Qual o encontrado ?	
02. Além da ação recomendada foi executada mais alguma intervenção ? (x) Não () Sim. Qual(is) ?	
Obs: Após conclusão, efetuar a baixa da RCI pelo portal MySeneq ou remeter cópia do formulário preenchido para a SEMEQ	

Figura 4.24 - Caso real: defeito no inversor

A intervenção foi realizada após o relatório e o problema foi sanado.

5. Conclusões e Recomendações para trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Observando os resultados analisados em estudos anteriores, viu-se a capacidade da Análise de Assinatura Elétrica na detecção de diversas avarias e monitoramento de condição de operação de motores de indução trifásicos, assim, concluiu-se a eficácia de tal técnica e optou-se pelo desenvolvimento do equipamento em questão.

Sendo assim, o trabalho proposto tinha o objetivo de desenvolver um equipamento portátil capaz de aplicar as técnicas de ESA visando o acompanhamento da condição dessas máquinas de forma a aplicar um processo de manutenção preditiva nos motores monitorados seguindo as necessidades de um modelo de prestação de serviços, objetivos esses alcançados através do atendimento dos requisitos determinados no início do projeto.

Com os resultados obtidos experimentalmente e demonstrados em alguns casos reais, viu-se mais uma vez a eficácia da técnica e a capacidade do equipamento para a detecção das avarias estudadas através, tanto das análises via espectros de frequência quanto dos valores medidos e calculados.

Tendo isso posto, conclui-se que o equipamento atingiu os objetivos propostos se demonstrando capaz de detectar essas e outras avarias em motores de indução através da análise correta dos dados coletados e atendendo a todos os requisitos impostos.

5.2 Trabalhos Futuros

Um estudo apropriado para outras falhas em motores de indução trifásicos pode ser facilmente realizado utilizando do mesmo equipamento proposto, para isso, basta a geração de outras avarias, especificação correta dos parâmetros de aquisição e a análise de suas influências na máquina.

Pode-se ainda adaptar o equipamento para um modelo de medição contínuo onde este ficaria fixo à máquina monitorada, faria as aquisições programadas e enviaria os resultados, por exemplo, via web para a equipe de analistas. Um projeto assim pode ainda ser calibrado para disparar alarmes quando alguma característica for detectada avisando aos operadores sobre alguma condição de operação ruim do motor. Para por em prática tal ideia basta repensar a

mecânica do equipamento bem como algumas características de alimentação e visualização de dados já que toda a lógica de controle, aquisição e processamento de sinais seriam os mesmos.

Foi desenvolvido anteriormente a esse estudo um equipamento capaz de realizar os ensaios off-line baseados na técnica de MCA em motores elétricos e, com algum trabalho simplesmente mecânico, é possível fundi-lo ao projeto proposto aqui, a fim de possuir um equipamento portátil capaz de realizar todos os ensaios On-line e Off-line na máquina, proporcionando um diagnóstico mais completo do motor.

REFERÊNCIAS

- [1] ABRAMAN - A Situação da Manutenção no Brasil. 26º Congresso Brasileiro de Manutenção, 2011.
- [2] MOUBRAY, J. Reliability-Centered Maintenance. 2nd ed - Woodbine, NJ Industrial Press Inc., 1997.
- [3] ALMEIDA, Márcio Tadeu e GÓZ, Ricardo Damiano Sales. Apostila do Curso de Vibrações em Motores. FUPAI, Itajuá, 1994.
- [4] OTANI, Mario e MACHADO, Waltair Vieira. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial, v. 04, n. 02: p. 01-16, 2008
- [5] ALMEIDA, Antônio Tadeu. Lyrio. Aposila de máquinas elétricas, 2010.
- [6] SILVA, Jonas Guedes Borges da. Aplicação de análise de componentes principais (PCA) no diagnóstico de defeitos em rolamentos através da assinatura elétrica de motores de indução – Universidade Federal de Itajubá, Fevereiro de 2008.
- [7] MEHALA, Neelam. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis. Electrical Engineering Department National Institute of Technology Kurukshetra. Registration n. 2K07-NITK-PhD-1160-E India. October, 2010.
- [8] Danos em enrolamentos de motores de indução. Disponível em: http://www.waldesa.com.br/assistencia_2.asp. Acessado em outubro de 2013.
- [9] B.M. Ebrahimi, J. Faiz, B.N. Araabi. Pattern identification for eccentricity fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors using stator current monitoring. IET Electr. Power Appl., 2010, Vol. 4, Iss. 6, pp. 418–430.
- [10] S. Nandi, R. M. Bharadwaj, and H. A. Toliyat, “Mixed eccentricity in three phase induction machines: Analysis, simulation and experiments,” in *Conf. Rec. 37th IEEE Ind. Appl. Soc. Conf.*, Oct. 6–10, 2002, vol. 3, pp. 1525–1532.
- [11] LIMA, Walter da Costa e ARANTES, Jose Antonio Salles. Manutenção Preditiva Caminho para a Excelência e Vantagem Competitiva. Disponível em: <http://www.unimep.br/phpg/mostracademica/anais/4mostra/pdfs/616.pdf>. Acessado em Agosto de 2013.
- [12] RV Tech Engenharia Elétrica, definição de Termografia. Disponível em: http://www.rvtechengenharia.com.br/termografia_definicao.htm. Acessado em Agosto de 2013.
- [13] Miller, Ronnie K. e McIntire, Paul, Nondestructive Testing Handbook – Volume Five, Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing – ASNT, United States of America, 1987.

- [14] BONALDI, E. L. Manutenção Preditiva em Motores de Indução Trifásicos através do Espectro de Corrente do Estator, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2002.
- [15] C. Hargis, B. G. Gaydon, and K. Kamash, 1982, "The detection of rotor defects in induction motors", in Proc. Int. Conf. Electrical Machines – Design Applications, London, July, pp. 216-220.
- [16] Deleroi W., 1984, "Der stabbruch im kaufglauber eins asychonomotor", Archiv fur Elektrotechnik, vol. 67, pp. 91-99. Elkassabgy N. M. and Eastham, A. R., 1992, "Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on Induction Machine".
- [17] Williamson S. and Smith A. C., 1982, "Steady state analysis of 3-phase cage motors with rotor-bar and end-ring faults", in Proc. Inst. Elec. Eng., Vol.129, No. 3, pp. 93-100.
- [18] Lowther D. A. and Silvester P. P., 1986, "Computer-Aided Design in Magnetics". New York: Springer-Verlag. Milimonfared J., Kelly H. M., Minassians A. D., Namdi S. and Toliyat H. A., 1998.
- [19] Elkassabgy N. M., Eastham A. R., and Dawson G. E., 1986, "The detection and effects of broken bars in cage rotor induction machines", in Proc. IEEE Workshop Electromagn. Field Comput., Schenectady, New York, Oct., pp. G24-G28.
- [20] Kliman, G. B.: "The Detection of Faulted Rotor Bars in Operating Induction Motors"; Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Munchen, Germany, Part 2, pp. 500-502, 8-10 September, 1986.
- [21] Thomson, W. T. e Stewart, I. D. "On-line Currente Monitoring for Detectiong Air gap Eccentricity and Broken Rotor Bars in Inverter Variable Speed Drives". Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, September de 1988, Vol. 3, pp. 211-214.
- [22] Notelet, F. and Ravalitera, G.: "Assessment of the Induction Motor Eccentricity Deduced from the Fluctuations of the Feeding Currents"; Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Lausanne, Switzerland, Part 3, pp. 1177-1179, September 18-21, 1984.
- [23] Cameron, J. R.; Thomson, W. T. and Dow, A. B.: "Vibration and Current Monitoring for Detecting air gap Eccentricity in Large Induction Motors"; Second International Conference on Electrical Machines – Design and Applications, IEE Conference Publication Number 254, pp. 173-179, 17-19 September, 1985.
- [24] D. G. Dorrell, W. T. Thomson, and S. Roach, "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors," IEEE Transactions on Industry Applications. Feb. 1997; 33(1), pp. 24-34, 1997.

- [25] W. T. Thomson and A. Barbour, "On-line current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static airgap eccentricity in three-phase induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Dec. 1998; 13(4): 347-57.
- [26] J. M. Cardoso and E. S. Saraiva, "Predicting the level of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors, by Park's vector approach," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting 1992*: 132-5 vol.1, 1992.
- [27] Thomson, W. T.; Deans, N. D.; Leonard, R. A. and Milne, A. J.: "Condition Monitoring of Induction Motors for Availability Assessment in Offshore Installations" 4th Euredata Conference, Venice, Italy, March, 1983.
- [28] Schoen R. R., et al. "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring" *IEEE Transactions on Industry Application*. 1995, Vol. 31, N 6, pp. 1274-1279.
- [29] Obaid, R. R., Habetler, T. G. e Stack, J. R. "Stator Current Analysis for Bearing Damage Detection in Induction Motors". *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines Power Electronics and Drivers*. 2003, pp. 182-187.
- [30] Maier, R. "Protection of Squirrel-Cage Induction Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information". *Industry Applications, IEEE Transactions on*. 1992, Vol. 28, N° 2, pp. 376- 380.
- [31] Legowski, S. F. e Trzynadlowski, A. M. "Instantaneous Stator Power as a Medium for the Signature Analysis of Induction Motors". *Industry Applications Conference*. 1995, Vol. 1, pp. 619-624.
- [32] Trzynadlowski, A. M. e Legowski, S. F. "Diagnostics of Mechanical Abnormalities in Induction Motors Using Instantaneous Electric Power". *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Dezembro de 1999, Vol. 14, N° 4, pp. 1417-1423.
- [33] Cardoso, A. J. M. e Saraiva, E. S. "Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors by Park's vector approach" *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1993, Vol. 29, N° 5, pp. 897-901.
- [34] Yazici, B. e Kliman, G. B. "An Adaptive Statistical Time-Frequency Method for Detection of Broken Bars and Bearing Faults in Motors Using Stator Current". *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1999, Vol. 35, N° 2, pp. 442-452.
- [35] Silva, J. L. H. e Cardoso, A. J. M. "Bearing Failures Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach" *Industrial Electronics Society*. 2005.
- [36] Benbouzid, M. E. H. "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000, Vol. 47, N° 5, pp. 984-993.
- [37] Obaid, R.R., Habetler, T. G. e Gritter, D. L. "A Simplified Technique for Detecting Mechanical Faults Using Stator Current in Small Induction Motors". *Proceedings of the 35th*

Annual Meeting and World Conference on Industrial Application of Electrical Energy. Julho de 2000.

[38] Bonaldi, E. L. Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de indução trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2006.

[39] Mehala, Neelam e Dahiya, Ratna. Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis. International Journal of Systems Applications, Engineering & Development – Volume 2, issue 1, 2007.

[40] K.Vinoth Kumar e S.Suresh Kumar. LabVIEW based Condition Monitoring of Induction Machines. I.J. Intelligent Systems and Applications, 2012, 3, 56-62.

[41] Brito, Jorge Nei, Baccharini, L. M. Rabelo, Filho, P. C. M. Lamim e Pederiva, Robson. Detecção de Barras quebradas em motores elétricos utilizando análise de corrente e fluxo magnético. Disponível em: http://www.tecem.com.br/downloads/Deteccao_Barras_Quebradas_Motores_Eletricos.pdf. Acessado em: Julho de 2013.

[42] PdMA Corporation - Introducción al MCEmax, Apostila de curso de treinamento, 2008.

[43] Randy R. Schoen, Brian K. Lin, Thomas G. Habetler, Jay H. Schalg, and Samir Farag, “An unsupervised, on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring”. IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 31, Bo. 6, pp. 1280-1286, 1995.

[44] Jason R. Stack, Thomas G. Habetler, Ronal G. Harley, “fault classification and fault signature production for rolling element bearings”, IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 40, No. 3, pp. 735-739, 2004.

[45] M. Blodt, P. Granjon, B. Raiso, and G. Rostaing, “Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring”, Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium, Vol. 1, pp. 383-388, May 2004.

[46] W. J. Staszewski, K. Worden, And G. R. Tomlinson, “Time-frequency analysis in gearbox fault detection using the Wigner-Ville distribution and pattern recognition” Mechanical System and Signal Processing, Vol. 11, No. 5, pp. 673-692, 1997.

[47] W. J. Wang and P. D. Mcfadden, “Early detection of gear failure by vibration analysis- Interpretation of the time-frequency distribution using image processing techniques” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 7, No. 3, pp. 205-215.

[48] Assunção F. O. “Técnicas de Análise Preditiva para Falhas em Motores de Indução Trifásicos”. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2005.

[48] W. Wang. “Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique” Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 15, No.5, pp.887-903, 2001.

- [49] Benbouzid, M. E. H., “A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, October, N0.5, pp. 984-993,2000.
- [50] Thomson, W. T. “On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure”. Electric Machines and Drives Conference. 2001, pp. 891-898.
- [51] Penrose, H. W. “Practical Motor Current Signature Analysis Taking the Mystery Out of MCSA”. Disponível em: <http://www.alltestpro.com/pdf/PracticalSignatureAnalysis.pdf>. Citado em: 15 de Novembro de 2007.
- [52] Baccarini, Lane Maria Rabelo. “Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução”. Universidade Federal de Minas Gerais - Julho, 2002.
- [53] De Abreu, J. P. G. e Emanuel, A. E. “Induction Motor Thermal aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance: Loss of Useful Life and its Estimated Cost”. Industrial and commercial Power Systems Technical Conference. 2001, pp. 105-114.
- [54] Departamento de Sistemas e Controle de Energia – Unicamp. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a4.pdf>, acessado em Agosto de 2013.
- [55] Alves, A. C. Baleeiro e Dos Santos, Euler Bueno. Cálculo de potências aparente, ativa, não ativa e indicadores de distorção e desbalanço, e fator de potência segundo Buchholz-Goodhue e IEEE Standard 1459-2010. Universidade Federal de Goiás, 2010.
- [56] National Instruments: Vantagens da utilização do LabVIEW em pesquisas acadêmicas. Disponível em: <http://www.ni.com/white-paper/8534/pt/>. Acessado em Setembro de 2013.

ANEXO A – Fotos do Equipamento desenvolvido



Figura 6.1 - Foto do Equipamento desenvolvido



Figura 6.2 - Fotos do Equipamento realizando medições