



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA

ESTÁGIO PROFISSIONAL

**Estudo comparativo do método de análise de vibração e análise de assinatura de corrente de motor (MCSA) para deteção de falhas em motores elétricos de indução trifásico no Corredor Logístico de Nacala (CLN)**

**Discente:**

Magumisse, Melosovik Tomas

**Supervisor:**

Eng.º Zefanias Mabote

Maputo, 14 de dezembro de 2022

Magumisse, Melosovik Tomas

ESTÁGIO PROFISSIONAL

**Estudo comparativo do método de análise de vibração e análise de assinatura de corrente de motor (MCSA) para deteção de falhas em motores elétricos de indução trifásico no Corredor Logístico de Nacala (CLN)**

Trabalho apresentado para conclusão da  
Do curso de engenharia  
Elétrica na Universidade Eduardo Mondlane,  
faculdade de engenharia.

**Supervisor:**

Eng.º Zefanias Mabote

Maputo, 14 de dezembro de 2022

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA

**F1 - GUIA DE AVALIAÇÃO DO RELATÓRIO ESCRITO**

Nome do estudante: Melosovik Tomas Magumisse

Referência do tema: 2022ELEPD29 Data: 14/dezembro/2022

Titulo do tema: : Estudo comparativo do método de análise de vibração e análise de assinatura de corrente de motor (MCSA) para deteção de falhas em motores elétricos de indução trifásico no Corredor Logístico de Nacala (CLN)

| <b>1. Resumo</b>   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|
| 1.1. Apresentação dos pontos chaves no resumo (clareza, organização, correlação com o apresentado) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <b>Secção 1 subtotal (max: 5)</b>  |   |   |   |   |   |

| <b>2. Organização (estrutura) e explanação</b>            |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 2.1. Objectivos   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |   |   |   |   |    |
| 2.2. Introdução, antecedentes e pesquisa bibliográfica    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 2.3. Metodologias   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 2.4. Resultados, sua análise e discussão                  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 2.5. Conclusões e aplicação dos resultados(recomendações) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| <b>Secção 2 subtotal(max: 45)</b>                         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

| <b>3. Argumentação</b>                                  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 3.1. Criatividade e originalidade                       | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |   |   |   |   |    |
| 3.2. Rigor  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |   |   |   |   |    |
| 3.3. Análise crítica, evidência e lógica                | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 3.4. Relação objectivos/ métodos/ resultados/conclusões | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |   |   |   |   |    |
| 3.5. Relevância   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |   |   |   |   |    |
| <b>Secção 3 subtotal(max: 30)</b>                       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

| <b>4. Apresentação e estilo da escrita</b>                            |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| 4.1. Legibilidade e organização                                       | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 4.2. Ilustração e qualidade das figuras e tabelas                     | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 4.3. Estilo da escrita (fluência do texto, uso da língua e gramática) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 4.4. Fontes bibliográficas (citação correcta, referências, etc)       | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <b>Secção 4 subtotal(max: 20)</b>                                     |   |   |   |   |   |

|                                   |  |                          |  |
|-----------------------------------|--|--------------------------|--|
| <b>Total de pontos (max: 100)</b> |  | <b>Nota (=Total*0,2)</b> |  |
|-----------------------------------|--|--------------------------|--|

Nota: Quando exista a componente gráfica (desenhos técnicos), a nota acima é multiplicada por 0,8 cabendo os restantes 20% do peso à referida parte gráfica.

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

**TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA**

Declaro que o estudante Melosovik Tomas Filimone Magumisse, entregou no dia 14/dezembro/2022 as 2 cópias do relatório do seu Trabalho de Estágio Profissional com a referência: 2022ELEPD29, intitulado: Estudo comparativo do método de análise de vibração e análise de assinatura de corrente de motor (MCSA) para deteção de falhas em motores elétricos de indução trifásico no Corredor Logístico de Nacala (CLN)

Maputo, 12 de dezembro de 2022

Chefe da Secretaria

---

(Arlete Chiconela)

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro que este relatório de estágio profissional nunca foi apresentado para obtenção de qualquer grau ou num outro âmbito e que ela constitui o resultado do meu labor individual.

Melosovik Magumisse

---

## DEDICATÓRIA

A:

Deus por todas as bênçãos que me deu.

Meus pais biológicos Filimone Magumisse e Fátima Machicana

Meus pais adotivos Alfredo Magumisse e Singa Muagura.

Pela sua solidariedade e apoio incondicional.

Os meus irmãos,

Por todo apoio.

Faculdade de Engenharia, os meus colegas e os docentes

A empresa ICRO Mozambique que abriu as portas para a realização do estágio académico.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho não poderia ter sido realizado sem a ajuda de diversas pessoas às quais registo minha gratidão. Ao meu Supervisor Eng° Zefanias Mabote pelo apoio. A sua disponibilidade irrestrita, sua forma exigente, creio que deram norte a este trabalho, facilitando o alcance de seus objetivos. Se tivesse que começar o trabalho novamente, sem dúvida, escolheria você como Supervisor.

Ao meu supervisor da empresa que fez o acompanhamento passo a passo em campo, para a colecta de dados e as análises dos dados.

Agradeço Imensamente a minha família geral, aos meus país, meus irmãos, primos e tios pelo apoio incondicional.

Aos meus amigos/colegas Letícia Jonasse, Lino Conde, Jonas Fernando e Samuel Junior por darem o suporte académico.

Agradeço pelo apoio dos meus irmãos em Cristo da Igreja Baptista do Alto – Mãe.

## RESUMO

O motor de indução trifásico é a principal fonte de conversão de energia elétrica em energia mecânica do setor industrial. Estes estão sujeitos a esforços térmicos, elétricos e mecânicos, que por sua vez, podem acarretar em falhas as quais comprometem seu rendimento e podem retirá-los de operação, produzindo perdas e aumentando custos de manutenção em ambientes industriais. Este projecto tem como estudo o grau de assertividade fazendo análise comparativa dos métodos de análise de vibração e análise de assinatura de corrente para detecção de defeitos nos MIT, devido a notoriedade de falhas que apresentam no Porto da CLN, tem a finalidade da deteção de falhas como (curto-circuito entre espiras do estator, quebra de barras do rotor). O estudo baseia-se na pesquisas bibliográficas e pesquisas de campo para conhecimento das falhas, o processo e as formas de deteção das falhas.

**Palavras – Chaves:** Motor de indução trifásico, deteção de defeitos nos MIT e técnicas de preditivas



## **ABSTRACT**

The three-phase induction motor is the main source of conversion of electrical energy into mechanical energy in the industrial sector. These are subject to thermal, electrical and mechanical efforts, which, in turn, can lead to failures which compromise their performance and can remove them from operation, producing losses and increasing maintenance costs in industrial environments. This project aims to study the degree of assertiveness by making a comparative analysis of the methods of vibration analysis and current signature analysis for detecting defects in MIT, due to the notoriety of failures that they present in the Port of CLN, it has the purpose of detecting failures such as (short circuit between stator turns, breakage of rotor bars). The study is based on bibliographic research and field research for knowledge of failures, the process and ways of detecting failures.

**Keywords:** Three-phase induction motor, fault detection in MIT and predictive techniques

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Tipos de motores elétricos.....  | 8  |
| Figura 2: Partes integrantes do motor de indução trifásico .....   | 10 |
| Figura 3: Fontes de falhas em máquinas de indução .....  | 12 |
| Figura 4: Excentricidade do rotor em relação ao estator.....   | 13 |
| Figura 5: Espectro característico de excentricidade na análise do sinal de corrente .....  | 14 |
| Figura 6: Espectro característico de excentricidade gerando altas frequências no sinal de vibração .....   | 16 |
| Figura 7: Curto-circuito entre espiras.....  | 17 |
| Figura 8: Espectro característico de curto-circuito nas espiras em análise de corrente .....   | 18 |
| Figura 9: Espectro de sinal de vibração característico de curto-circuito, apresentado frequência de $2 \times$ Frequência de rede em um motor alimentado por 60 Hz ..... | 18 |
| Figura 10: Espectro característico de frequências de barras quebradas em análise de corrente... ..   | 19 |
| Figura 11: Sintomatologia espectrais de folgas .....   | 21 |
| Figura 12: Espectros de folga mecânica em sinal de corrente.....   | 21 |
| Figura 13: Dimensões utilizadas para o cálculo.....  | 22 |
| Figura 14: Espectro de sinal de corrente do motor defeituoso com furo de 4mm na pista interna .  | 23 |
| Figura 15: Espectro sintomatológico de defeito no rolamento em análise de vibração .....   | 24 |
| Figura 16: Espectro característico de desalinhamento em MCSA .....   | 25 |
| Figura 17: Espectro característico de desalinhamento .....   | 26 |
| Figura 18: Esquema para a determinação do espectro da corrente.....  | 27 |
| Figura 19: Tabela de severidade para barras quebradas .....  | 29 |
| Figura 20: Exemplos de Mapa Espectral .....  | 31 |
| Figura 21: Layout da unidade fabril - Porto da CLN.....  | 34 |
| Figura 22: Espectro de vibração do motor da transportadora TR-3220NA-04 .....  | 36 |
| Figura 23: Espectro de vibração do motor-redutor do cabo de força da RC-3140NA-01 .....  | 37 |
| Figura 24: Espectro de vibração do motor da bomba de aspersão do VV-3120NA-01 .....  | 37 |
| Figura 25: Espectro de vibração do motor da bomba hidráulica de elevação da lança da EP-3140NA-01 .....  | 38 |
| Figura 26: Espectro de vibração do motor da transportadora da lança do CN-3220NA-01 .....  | 38 |
| Figura 27: Espectro de sinal de corrente do motor sinalizando a frequência fundamental do motor novo .....   | 40 |
| Figura 28: Espectro de sinal de corrente do motor sinalizando a frequência de banda lateral do motor removido .....  | 40 |
| Figura 29: Espectro de sinal de corrente do motor sinalizando a frequência fundamental do motor novo .....   | 41 |
| Figura 30: Espectro de sinal de corrente do motor sinalizando a frequência de banda lateral do motor novo .....  | 41 |
| Figura 31: Rolamento danificado.....   | 42 |
| Figura 32: Base do motor oxidada.....  | 43 |

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| CAPITULO I: INTRODUÇÃO.....  | 1  |
| 1.1. Contextualização .....  | 1  |
| 1.2. Formulação de Problema .....  | 3  |
| 1.3. Justificativa.....  | 4  |
| 1.3. Objectivos.....   | 5  |
| 1.3.1. Objectivo geral.....  | 5  |
| 1.3.2. Objectivos específicos .....  | 5  |
| 1.4. Metodologia .....   | 6  |
| CAPITULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....   | 7  |
| 2.1. Conceito geral de máquinas de indução.....  | 7  |
| 2.1.1. Conceito e tipo de motor eléctrico.....   | 7  |
| 2.1.2. Princípio de funcionamento do motor de indução .....  | 8  |
| 2.1.3. Partes Constituintes do Motor de Indução.....   | 10 |
| 2.1.3.1. Partes integrantes do estator: .....  | 10 |
| 2.1.3.2. Partes integrantes do rotor: .....  | 11 |
| 2.1.3.3. Demais partes integrantes do motor de indução: .....  | 11 |
| 2.2. Falhas mais comuns em motores e as sintomatologias espectrais em análise de corrente e vibração ..... | 11 |
| 2.2.1. Falhas Eléctricas .....   | 12 |
| 2.2.1.1. Excentricidade do rotor .....   | 13 |
| 2.2.1.2. Curto-circuito no enrolamento do estator .....  | 16 |
| 2.2.1.3. Barras quebradas no rotor .....   | 18 |
| 2.2.2. Falhas Mecânicas .....  | 20 |
| 2.2.2.1. Folga de fixação do motor.....  | 20 |
| 2.2.2.2. Vibração nos rolamentos.....  | 22 |
| 2.2.2.3. Desbalanceamento do motor .....   | 24 |
| 2.2.2.4. Desalinhamento .....  | 24 |
| 2.3. Métodos de detecção de falhas em motores de indução trifásicos .....                                  | 26 |
| 2.3.1. Análise de Assinatura de Corrente do Motor (MCSA) .....   | 27 |
| 2.3.2. Análise de Vibração .....   | 29 |
| 2.3.2.1. Avaliações das vibrações.....   | 29 |
| 2.3.2.2. Curvas de tendência .....   | 30 |
| 2.3.2.3. Mapas Espectrais.....   | 30 |

|  |    |
|--|----|
| CAPITULO III: MEMORIAL DESCRITIVO E JUSTIFICATIVO.....   | 32 |
| 3.1. Descrição da empresa empregadora e a unidade fabril.....  | 32 |
| 3.1.1. Descrição da empresa ICRO Mozambique .....  | 32 |
| 3.1.2. Descrição da unidade fabril – Porto do Corredor Logístico Integrado de Nacala.....  | 32 |
| 3.2. Falhas comuns no porto da CLN .....   | 34 |
| 3.3. Falhas do MIT nos espectros de vibração e corrente do porto da CLN .....  | 35 |
| 3.3.1. Espectros de vibração.....  | 35 |
| 3.3.1.1. Espectro de vibração do motor da transportadora TR-3220NA-03<br>com falha da pista externa no rolamento dianteiro.....                            | 35 |
| 3.3.1.2. Espectro de vibração do motor-reductor de cabo de força da RC-<br>3140NA-01 com folga de fixação na saída do motor.....                           | 36 |
| 3.3.1.3. Espectro de vibração do motor da bomba de aspersão do VV-<br>3120NA-01 com desalinhamento paralelo .....  | 37 |
| 3.3.1.4. Espectro de vibração do motor da bomba hidráulica de elevação<br>da lança da EP-3140NA-01 com início de uma falha eléctrica<br>desconhecida ..... | 38 |
| 3.3.1.5. Espectro de vibração do motor da transportadora da lança do CN-<br>3220NA-01 .....  | 38 |
| 3.3.2. Espectro de análise de assinatura de corrente.....  | 39 |
| 3.3.2.1. Espectros de sinal de corrente do motor removido .....  | 40 |
| 3.3.2.2. Espectro de sinal de corrente do motor novo.....  | 41 |
| 3.4. Análise dos dados espectrais .....  | 42 |
| 3.5. Vantagens e desvantagens dos métodos em estudo.....   | 44 |
| CAPITULO IV: CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES e RECOMENDAÇÕES .....  | 46 |
| 4.1. Conclusões .....  | 46 |
| 4.2. Limitações .....  | 47 |
| 4.3. Recomendações .....   | 47 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....   | 48 |
| ANEXOS .....   | 50 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

AV – Analise de vibração

BPFO - falha nas pistas externa

BPFI - falha nas pistas interna

BSF – Rotação de esferas

CLN – Corredor Logístico Integrado de Nacala

CN – Carregador de navio

EP – Empilhadeira

FTF – Frequência da passagem da gaiola

FFT – Transformada rápida de Fourier

MCSA – Analise de assinatura de corrente do motor

MIT – Motor de indução trifásico

RC – Recuperadora

SE – Subestação elétrica

VV – Virador de vagões

# CAPITULO I: INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

A manutenção é um conjunto de cuidados técnicos indispensáveis, de grande valia nas indústrias que prezam pela constante produtividade, confiabilidade e disponibilidade de seus equipamentos.

O setor industrial possui preocupação com a qualidade e eficiência de seu processo de produção, com o menor custo possível. Considera-se que nenhum equipamento continuará operando com desempenho satisfatório à medida que o tempo passa, portanto, as empresas entendem a necessidade de aplicação de uma estratégia de manutenção confiável e segura.

Motores elétricos são usados em larga escala nas mais variadas indústrias e fábricas do mundo. Segundo estudos publicados no International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014) da IEEE, intitulado por Detection and Classification of Induction Motor Faults Using Motor Current Signature Analysis and Multilayer Perceptron, estima-se que quase 80% do total de motores elétricos, em operação, são de indução.

Diante dessa afirmação assume-se que o motor eléctrico tem uma importância imensurável em processos indústrias, em ponto de vista de manutenção este cenário confirma a manutenção do activo supracitado é importante e desafiador, pois não é racional usar a prática de “quebra-troca” para todo este quantitativo, porque seus custos de aquisição são bem elevados.

Em contra partida surge dois tipos de manutenção que pretende evitar o cenário arrolado anteriormente, a manutenção preventiva e preditiva, ambas possuem carregam o objectivo comum de evitar a manutenção corretiva, neste contexto a manutenção preditiva ganha vantagem por fazer se basear uso em técnicas não invasivas que permitem diagnosticar falhas em motores eléctricos, mesmo este em operação, diferentemente da manutenção

preventiva, que é essencialmente invasiva, pois, necessita que o motor eléctrico não esteja em funcionamento, conforme ratificado por (Bonaldi, 2005).

Desta forma, por meio de técnicas preditivas é possível detectar falhas em Motores eléctricos antes que tenha evolução ao ponto de impedir o funcionamento do mesmo, devido a danos irreversíveis que venham a acontecer e programar a intervenção no momento oportuno evitando maior tempo de para e custos avultados.

## 1.2. Formulação de Problema

O grau de importância na detecção de defeitos em motores elétricos está relacionado a diminuição dos custos de manutenção e conseqüentemente a maior disponibilidade dos equipamentos em produção. Com isso é aplicado um dos métodos de análise a qual é dada através das vibrações, pois o mesmo permite obter as componentes em frequência ao longo do tempo de funcionamento do equipamento, de forma a identificar a evolução de um possível problema.

Os motores elétricos da planta da CLN apresentam falhas que causam paradas emergencial durante o processo logístico e tem impactados vários custos de manutenção, destacando as falhas: desbalanceamento, desalinhamento, folgas mecânicas, defeitos de rolamento, barras quebradas ou trincadas, excentricidade do Air-gap, deterioração do isolamento, curto-circuito e empenamento do rotor.

Atualmente estes defeitos são detetados através da análise de vibração, o método de análise de vibração não tem assertividade para detenção destes defeitos no início da falha. Em contrapartida, o mesmo método tem baixo grau de confiabilidade para detenção de falhas estatóricas e rotóricas (barras quebradas ou trincadas, excentricidade do air-gap, deterioração do isolamento, curto-circuito, disfunção elétrica e empenamento do rotor). E este presente projecto têm o propósito de fazer estudo de implementação do método MCSA a baixo custo para detenção de falhas estatóricas e rotóricas no MIT, que servirá de grande auxílio para análise de vibração. E surge a seguinte pergunta: **De entre a análise de vibração e análise de assinatura de corrente de motor quais dos métodos têm maior assertividade para a deteção de falhas incipientes em Motores de indução trifásico?**



### 1.3. Justificativa

Este trabalho visa apresentar uma forma de aplicação prática da manutenção preditiva que pode ser utilizada pelas indústrias que possuem motores elétricos compondo uma parcela considerável de seu parque de ativos em operação e precisam de um acompanhamento adequado e que não necessite realizar paradas em seu processo de produção para detecção de possíveis falhas. Baseado na necessidade existente em reduzir gastos com falhas em motores elétricos que ocasionam custos elevados ao parque industrial.

Os Motores de Indução Trifásica (MIT), são indispensáveis para qualquer processo e este tem o tempo de vida útil bastante elevado, mas devido a exposição que estão inseridos na planta industrial aparecem falhas no meio do processo que causam custos elevados. O presente projecto visa fazer estudo de técnicas para continua monitoração por condição dos mesmos activos (MIT) de modo a garantir extensão da vida útil e a não paradas emergencial por corretiva. Já existe no plano de manutenção do Corredor Logístico Integrado de Nacala para manutenção preditiva para monitoração continua, pela qual a técnica usual para detenção de falhas nos MIT é a análise de vibração, em contra partida verifica-se baixo rendimento dos MIT, e falhas inesperadas devidos a defeitos encontrados no motor, surge a possibilidade de haver falta de assertividade do método de análise de vibração para detenção de falhas incipientes rotóricas e estátoricas no MIT, assim surge a motivação de fazer estudo comparativo entre o método de análise de vibração e MCSA para apurar se realmente o MCSA tem a capacidade de detecção das falhas incipientes rotóricas e estátoricas com maior confiabilidade em relação a análise de vibração .

## **1.3. Objectivos**

### **1.3.1. Objectivo geral**

Analisar de forma comparativa a técnica de análise vibração e análise de assinatura da corrente do motor (MCSA) para deteção de defeitos em Motores Eléctricos

### **1.3.2. Objectivos específicos**

- Apresentar as Falhas comuns em MIT;
- Identificar as falhas do MIT nos espectros de vibração e corrente;
- Apontar as vantagens e desvantagens dos métodos em causa;
- Discutir a assertividade dos métodos de análise vibração e análise de assinatura da corrente do motor para os defeitos em MIT.

## 1.4. Metodologia

Neste capítulo serão tratados os aspetos metodológicos utilizados para a elaboração deste trabalho, mostrando as etapas de pesquisa realizadas.

Para a elaboração deste projecto ser aplicada três metodologias:

1. **Revisão Bibliográfica:** Será fundamental para a elaboração do projecto um estudo sobre o tema, que consistira em constantes leituras em manuais, revistas, artigos, estudos de caso, entre outros materiais relevantes para o estudo;
2. **Pesquisa de Campo:** Consistirá em visita na planta onde estão instalados os motores de indução trifásico, de modo a fazer o mapeamento do activo, local e o ambiente de coleta de modo a garantir a segurança do colectador em campo e posteriormente levantamento de dados para construções de hierarquias, rotas e dados de frequências de funcionamento e naturais dos activos em estudo;
3. **Coleta de dados:** Consistirá na colecta de dados por meio de aparelho de colecta de vibração Microlog GX e requisição de dados de corrente em outra unidade fabril.
4. **Análise de dados:** Apos da coleta de dados em campo (**vibração e corrente instantânea**), farei análise dados em forma espectrais e nível global de tendência de modo a apurar o método com maior confiabilidade para detenção das falhas pertinentes a este estudo.

## CAPITULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura que serve como fundamentação teórica para sustentar o estudo. Foi estruturado com base nos aspetos abordados na pesquisa e nas práticas recomendadas pela bibliografia para as técnicas preditivas de manutenção de máquinas elétricas rotativas, pesquisadas de acordo com o desenvolvimento do estudo.

### 2.1. Conceito geral de máquinas de indução

#### 2.1.1. Conceito e tipo de motor eléctrico

(MENEGAT, 2014) O motor eléctrico atua basicamente como um conversor de energia, convertendo energia eléctrica em energia mecânica. Possui seu funcionamento fundamentado nos princípios do eletromagnetismo, onde a força de torque age sobre fios condutores de corrente eléctrica, imersos em um campo magnético. Há diversos tipos de motores eléctricos, entre os mais comuns estão os de corrente contínua e os de corrente alternada. Conforme descrito por (WEG, 2016), o motor eléctrico consiste em uma máquina dotada de capacidade para transformar energia eléctrica em mecânica. Entre os motores eléctricos mais utilizados, o motor de indução tem seu papel de destaque pois associada a sua construção simples, a máquina de indução possui também, baixo custo, facilidade de transporte, grande versatilidade quanto a adaptação dos mais variados tipos de cargas e rendimento elevados quando comparado a outros tipos de motores eléctricos. Afigura 1 apresenta o quão é vasto o universo tecnológico dos motores eléctricos. Os motores de corrente contínua e alternada, estão descritos de modo sucinto a seguir, na qual estão relatados algumas de suas características.

- ✓ **Motor de Corrente Contínua:** Apresentam custo elevado e necessitam de corrente contínua ou dispositivos que convertam corrente alternada em corrente contínua. Estes, podem operar com grande precisão e flexibilidade, podendo funcionar em uma ampla faixa de limites com velocidades ajustáveis;

- ✓ **Motor de Corrente Alternada:** Devido a distribuição de energia elétrica ser realizada normalmente em corrente alternada. Nesta categoria de motores elétricos, têm o motor assíncrono.

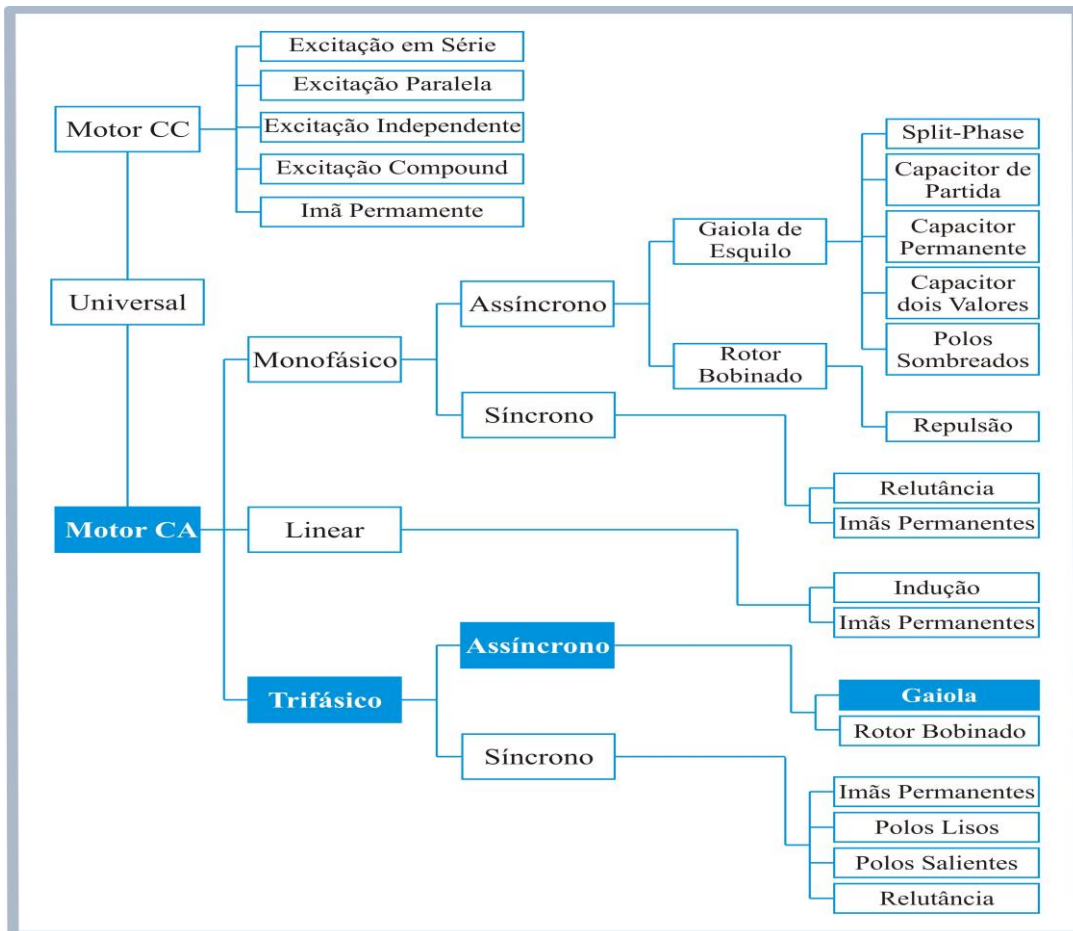


Figura 1: Tipos de motores elétricos

Fonte: (GOMES, 2014)

### 2.1.2. Princípio de funcionamento do motor de indução

De acordo com (UMANS, 2014), o funcionamento do motor de indução é explicado a partir da aplicação direta da corrente alternada junto aos enrolamentos do estator, enquanto o rotor recebe a corrente do estator por meio de indução. A excitação proveniente da conexão de uma fonte polifásica equilibrada aos terminais do estator do motor de indução, produz

um campo magnético no entreferro da máquina, na qual gira na velocidade síncrona. As tensões inseridas junto as bobinas do estator por meio de uma fonte de alimentação externa, produzem um campo magnético girante, com amplitude constante e frequência equivalente da rede de alimentação. Este campo magnético produzido pelo estator, ao atingir os condutores do rotor, induzem corrente, criando uma força eletromotriz, na qual o rotor gera seu próprio campo magnético girante. Desde modo, o campo magnético desenvolvido pelo rotor tenta alinhar-se ao campo girante gerado pelo estator, produzindo torque e movimento rotacional do eixo do rotor. O campo gerado pelas bobinas defasadas em 120° elétricos entre si, quando alimentado por uma fonte trifásica equilibrada e defasada com mesma angulação, produz um campo girante no entreferro de velocidade síncrona, que é determinada pelo número de polos existentes e proporcional a frequência aplicada, conforme a Equação. (1)

$$n_{sin} = \frac{120 * f}{p} \quad (2.1)$$

Onde:

- $n_s$  = Velocidade síncrona do campo girante;
- $f$  = Frequência da fonte;
- $P$  = Número de polos.

A diferença de velocidades entre os campos magnéticos girantes do estator e do rotor acarretam no escorregamento do rotor. A tensão induzida nas barras do rotor do motor de indução depende da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. A denominada velocidade de escorregamento do rotor é expressa em percentagem conforme apresentado na equação (2) (CHAPMAN, 2013)

$$S = \frac{n_{sin} - n_m}{n_{sin}} \quad (2.2)$$

- $n_{sin}$  representa a velocidade dos campos magnéticos;
- $n_m$  representa a velocidade mecânica do eixo do motor.

### 2.1.3. Partes Constituintes do Motor de Indução

O motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo, é constituído segundo WEG (2016), por duas partes fundamentais, o estator e o rotor. Além destas, outras partes que integram o motor de indução trifásico estão ilustradas na figura 2 e serão descritas a seguir:

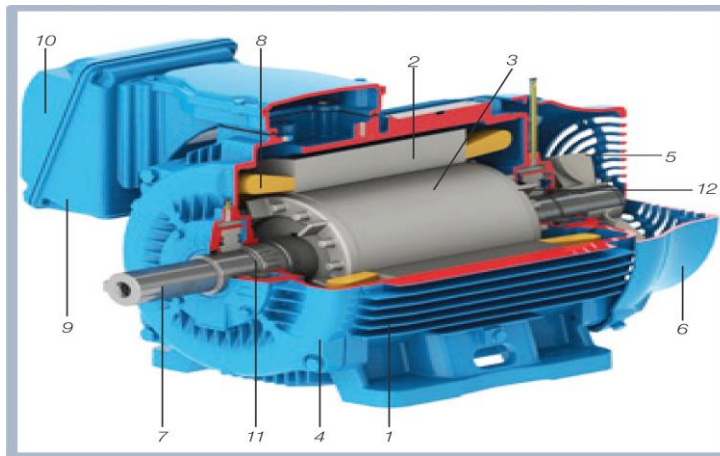


Figura 2: Partes integrantes do motor de indução trifásico

Fonte: (WEG, 2016)

#### 2.1.3.1. Partes integrantes do estator:

- (1) Carcaça produzida em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, na qual constitui a estrutura de suporte para as demais partes do motor.
- (2) Núcleo de chapas produzidas em aço magnético;
- (8) Os enrolamentos trifásicos são constituídos por três conjuntos simétricos de bobinas;

### **2.1.3.2. Partes integrantes do rotor:**

- (7) O eixo é responsável por toda transmissão da potência mecânica gerada pelo motor de indução;
- (3) As chapas são produzidas em aço magnético, similar às chapas do estator;
- (12) Barras e seus anéis de curto-circuito;

### **2.1.3.3. Demais partes integrantes do motor de indução:**

- (4) Tampa, (3) As chapas são produzidas em aço magnético, similar às chapas do estator;
- (5) Sistema de ventilação (ventilador);
- (6) Tampa defletora;
- (9) Caixa de ligações do motor;
- (6) Terminais de ligação;
- (11) Rolamentos.

## **2.2. Falhas mais comuns em motores e as sintomatologias espectrais em análise de corrente e vibração**

Motores de indução são máquinas consideradas robustas e muito tolerantes, sendo muito populares na indústria. Contudo, a manutenção preditiva é de suma importância para prever falhas e detectar alterações, diagnosticando o estado da máquina com a antecedência necessária para evitar eventuais problemas. As falhas em máquinas elétricas rotativas têm diversas origens, podendo ser atribuídas a problemas no projeto, a imperfeições na fabricação, montagem, instalação, ambiente de trabalho, a natureza da carga e cronograma de manutenção. Os motores de indução, assim como as outras máquinas elétricas, são submetidos a forças eletromagnéticas e mecânicas.



As falhas em motores elétricos podem ser classificadas como de natureza mecânica, elétrica ou até mesmo ambiental, esta causada em função da temperatura, umidade ou problemas com limpeza no ambiente. (MENEGAT, 2014)

Em se tratando de natureza mecânica, as principais falhas apresentadas no rotor são: excentricidade (estática ou dinâmica) e desalinhamento. No estator nota-se a presença também problemas de excentricidade, além de folga no pacote de chapas.

No que diz respeito a falhas de natureza elétrica, no rotor gaiola de esquilo destacam-se: quebra de barras, folga nas barras e má conexão com anéis metálicos das extremidades. Além disso, o curto-circuito de entre barras do rotor (não sendo em suas extremidades) também é uma falha comum. As falhas acima mencionadas são os principais, existindo muitas falhas secundárias (AHMED, 2003)

Na Figura 3 podem ser observadas as principais fontes de falhas em máquinas de indução.

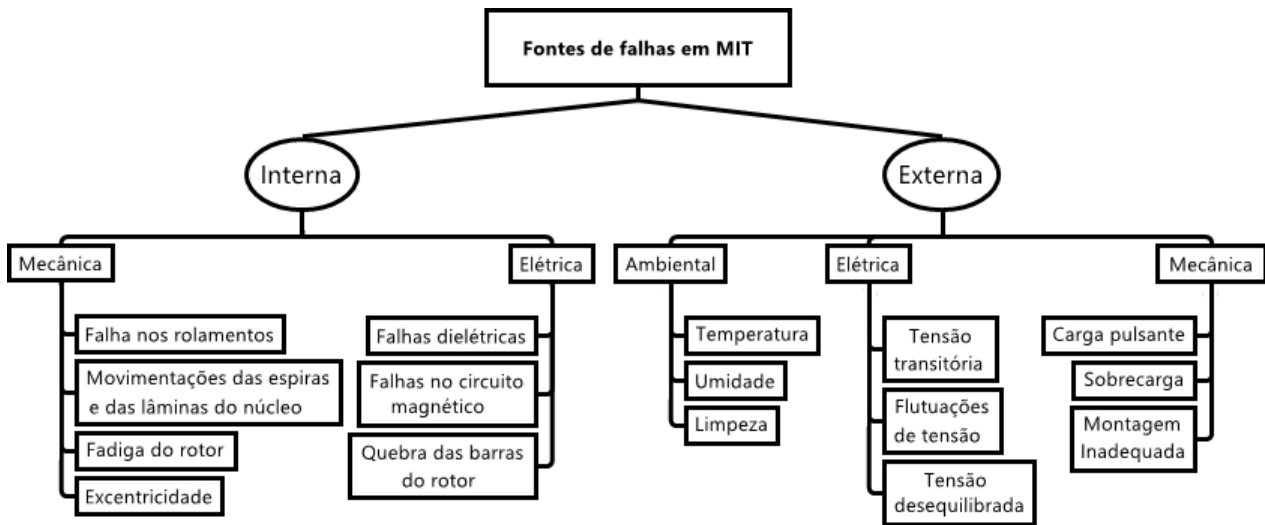


Figura 3: Fontes de falhas em máquinas de indução

FONTE: (AHMED, 2003)

### 2.2.1. Falhas Elétricas

As falhas elétricas estão relacionadas a alteração da força de atração entre o estator e o rotor, ocasionadas também pela excentricidade do rotor, problemas na estrutura física do rotor como, por exemplo, rompimento de barras e fatores relacionados também a falhas

no isolamento do enrolamento do estator.

### 2.2.1.1. Excentricidade do rotor

Os rotores dos motores não são perfeitamente concêntricos em relação ao estator, pequenas variações de excentricidade, dentro dos limites de operação são toleráveis. Contudo quando esta falha é pronunciada é capaz de gerar amplitudes e frequências de vibrações prejudiciais ao motor, como também a produção de ruído e elevação de temperatura em componentes associados ao conjunto como, por exemplo, em rolamentos. Em casos extremos a excentricidade pode causar o atrito entre o rotor e o estator de forma a danificar o isolamento e os condutores do enrolamento do estator (RODRÍGUEZ, BELAHCEN, ARKKIO, LAIHO, & DAVIU, 2008). A excentricidade é definida como a diferença do centro de rotação entre o estator e o rotor e está relacionado diretamente ao balanceamento do rotor. As Figura a e b representam excentricidade estática e dinâmica respectivamente.

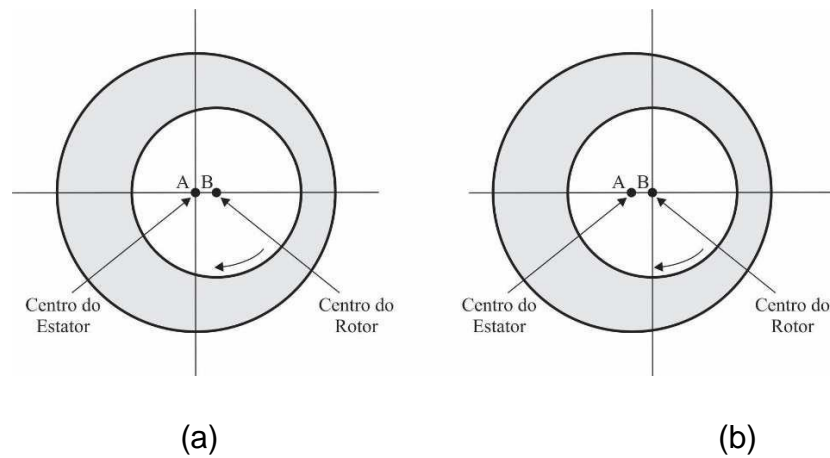


Figura 4: Excentricidade do rotor em relação ao estator

Fonte: (MENEGAT, 2014)

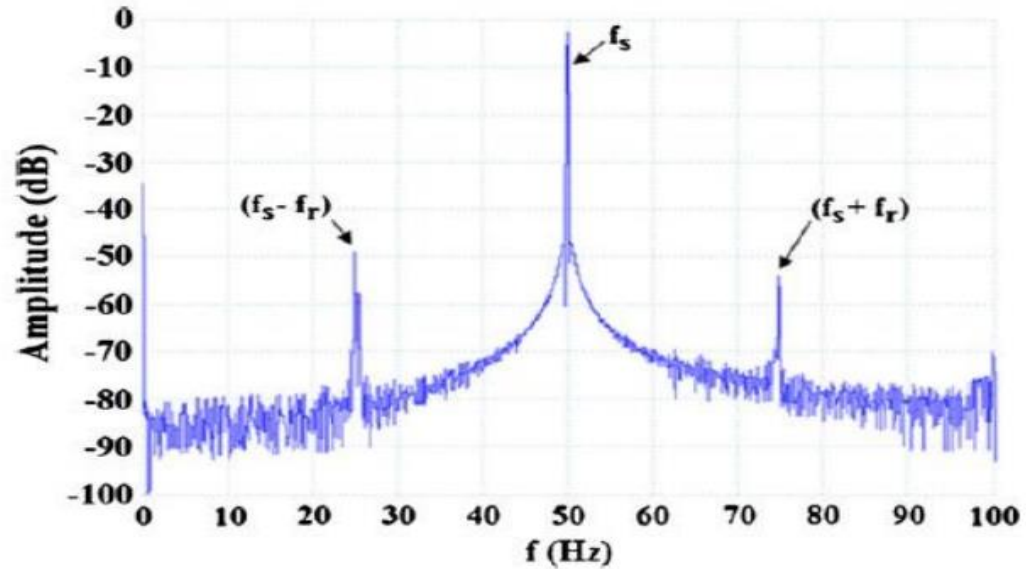


Figura 5: Espectro característico de excentricidade na análise do sinal de corrente  
 Autor: (WAGECK, 2015)

Segundo (MAHELA, 2010) em seus artigos afirma que em termos de análise de vibração, a existência de excentricidade estática origina componentes de frequência com o valor de duas vezes a frequência de alimentação,  $2fe$ . A excentricidade dinâmica origina bandas laterais de frequência de escorregamento em torno de  $fr$  e  $2f$ , estes são determinados com base as seguintes equações:

#### Excentricidade estática

$$f_{exes} = [(kNc) (1 - s) p \pm v] fs \quad (2.3)$$

#### Excentricidade dinâmica

$$f_{exdi} = [(kNc \pm nd) (1 - s) p \pm v] fs \quad (2.4)$$

Onde  $k$  é um inteiro positivo,

$Nc$  é o número de cavas do rotor,

$p$  é o número de pares de polos,

$v$  um número par,

$fe$  é a frequência de alimentação e

$nd = 1, 2, 3, \dots$ , para a excentricidade dinâmica.

Se coexistirem os dois tipos de excentricidade podem aparecer componentes de baixa frequência dadas por:

$$f_{exbf} = 2f_e \pm f_r \quad (2.5)$$

Sendo:

$f_r$  a frequência de rotação

Em termo de análise de corrente, a presença de excentricidade estática ou dinâmica revela, no espectro de corrente do estator, as componentes de frequência dadas por:

$$f_{ex} = [(kNc \pm nd) (1 - s) p \pm n] f_e \quad (2.6)$$

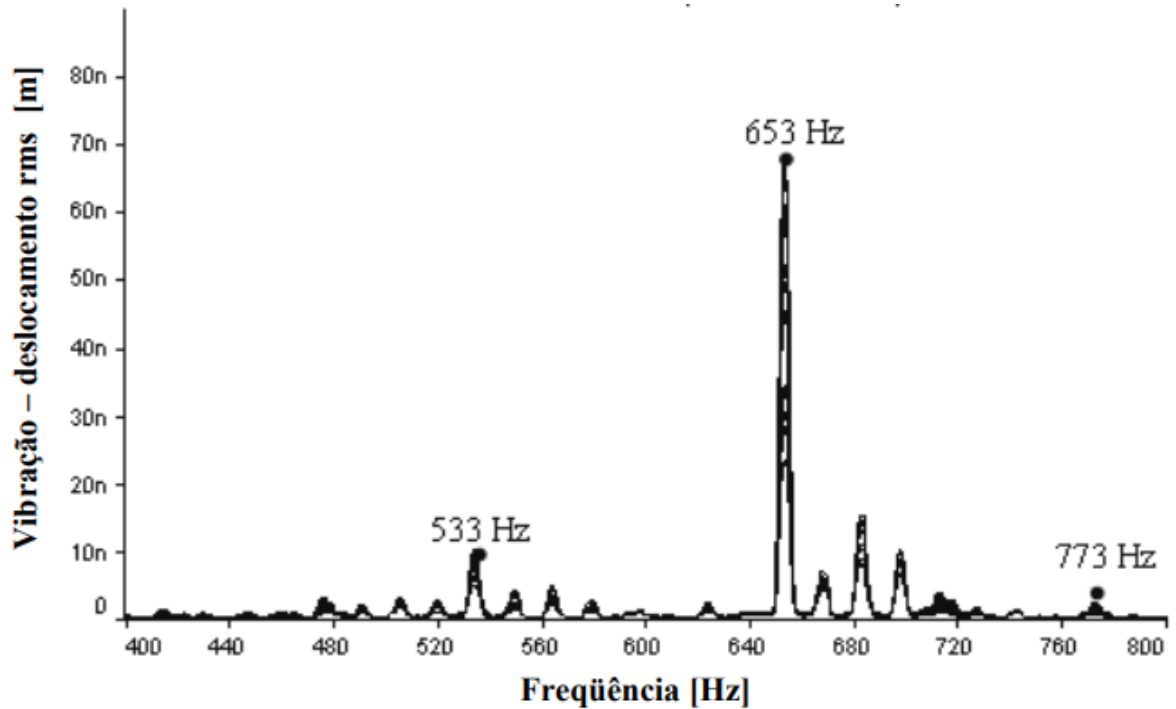
Onde:

$nd$  é a ordem de excentricidade e assume o valor de  $nd = 0$  quando a excentricidade é estática e  $nd = 1, 2, 3, \dots$  quando a excentricidade é dinâmica,

Se coexistirem os dois tipos de excentricidade junto à frequência de alimentação poderão existir baixas frequências dadas por:

$$f_{exbf} = |f_e \pm k f_r| \quad (2.7)$$

Na figura 6, podemos ver característica de excentricidade encontrado no espectro de vibração em altas frequências, conforme (NAU, 2007) surgem altas frequências no espectro devido a excitação ressonante que surge internamente no motor.



*Figura 6: Espectro característico de excentricidade gerando altas frequências no sinal de vibração*

Fonte: (NAU, 2007)

### **2.2.1.2. Curto-circuito no enrolamento do estator**

O curto-circuito entre espiras de uma mesma fase é um problema bastante comum em motores de indução. Esta falha origina-se de problemas de isolamento no enrolamento em questão, gerando aumento da corrente na fase afetada e uma ligeira variação de amplitude nas outras fases do estator, modificando seu fator de potência e amplificando as correntes induzidas no rotor.



*Figura 7: Curto-circuito entre espiras*

FONTE: (DINIZ, 2008)

Através da Equação (2.8), pode-se determinar os componentes espectrais que caracterizam falhas de curto-circuito (GAZZANA, 2004).

$$f_{cc} = f_f * [k \pm \frac{n(1-s)}{p}] \quad (2.8)$$

Onde:  $k = 1, 3, 5 \dots$  fator multiplicativo para cálculo de bandas laterais;

$n = 1, 2, 3 \dots$  fator multiplicativo para cálculo de bandas laterais;

$s$  = escorregamento relativo;

$p$  = par de polos;

$f$  = frequência da fundamental (Hz);

$f_{cc}$  = frequência indicadora de curto-circuito (Hz).

As componentes frequências que caracterizam problemas de excentricidade também seguem a Equação (2.8). Desta forma, caso o motor já apresente excentricidade, a detecção de curto-circuito entre espiras do estator pode se tornar mais difícil, sendo muitas vezes mascarada.

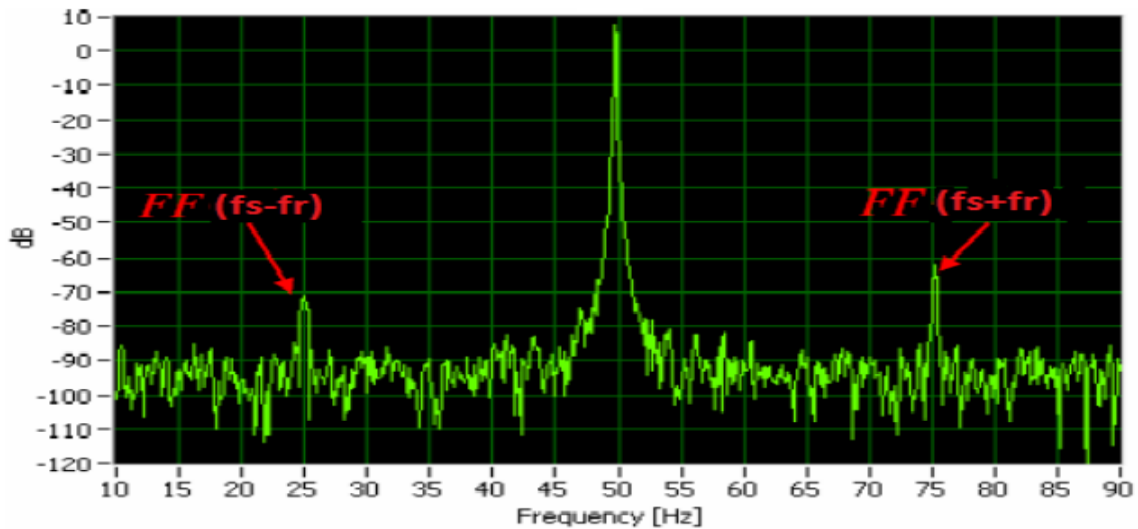


Figura 8: Espectro característico de curto-circuito nas espiras em análise de corrente

Fonte: (MAHELA, 2010)

Em termos de análise de vibração, as forças magnéticas existentes no motor farão com que este apresente componentes de vibração com o valor de duas vezes a frequência de alimentação,  $2f_e$ , além da frequência de rotação do motor

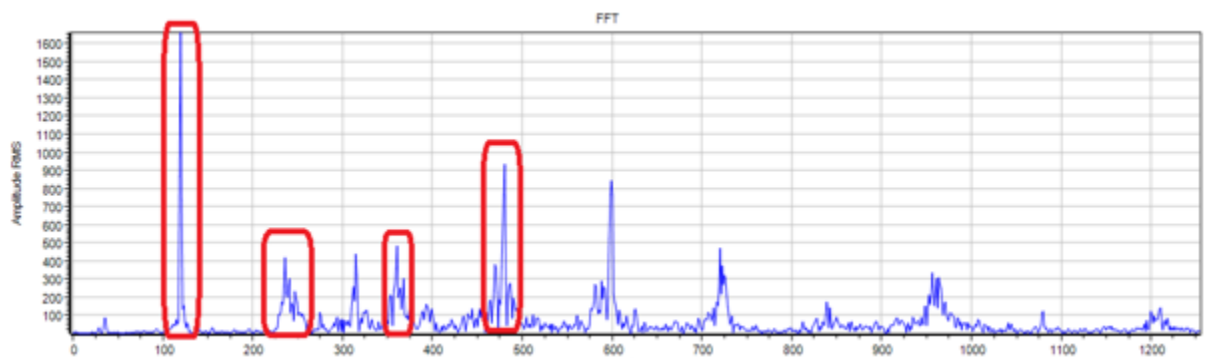


Figura 9: Espectro de sinal de vibração característico de curto-circuito, apresentado frequência de  $2 \times$  Frequência de rede em um motor alimentado por 60 Hz

Fonte: (NAU, 2007)

### 2.2.1.3. Barras quebradas no rotor

A quebra de barras não é uma falha muito comum em se tratando de máquinas de indução de baixa potência. Contudo, em motores industriais de alta potência, este tipo de

falha merece atenção especial, pois estão mais suscetíveis a este tipo de dano, em função da pequena distância de entreferro e seu alto conjugado de partida (BRIAN, 1998).

Segundo (AHMED, 2003), a detecção de barras quebradas em rotores pode ser bastante difícil de ser realizada utilizando-se técnicas como de monitoramento das vibrações. Contudo, este tipo de falha pode ser detectado através do monitoramento das correntes do estator.

As frequências características geradas por um rotor com barras quebradas são dadas pela Equação (2.9) (GAZZANA, 2004)

$$f_{bq} = f_f(1 \pm 2ks) \quad (2.9)$$

A detecção do problema de barras quebradas é feita pela verificação das bandas laterais de duas vezes a frequência da corrente induzida no rotor ( $f_s$ ) em torno da frequência fundamental ( $f_f$ ). Quanto menor a diferença em dB das duas amplitudes, maior o número de barras quebradas. A figura 10 ilustra um exemplo de espectro característico de barra quebradas detectada em análise de corrente.

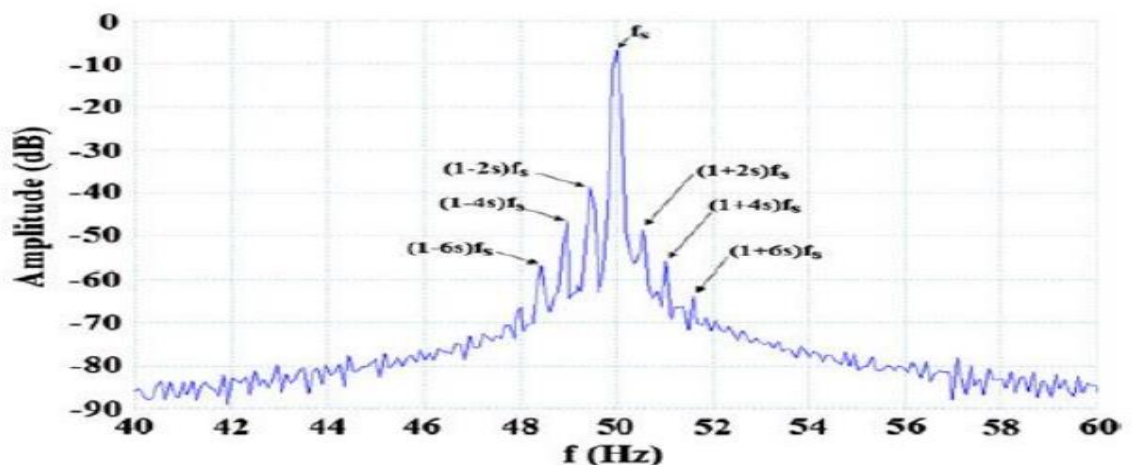


Figura 10: Espectro característico de frequências de barras quebradas em análise de corrente

FONTE: (PAULO, 2007)



Quando a colecta é realizado a vazio ou com baixa carga, o escorregamento tende a ser baixo, o que, de acordo com a Equação (3.9), faz com que as componentes de  $f_{bq}$  se situem bastante próximas da frequência fundamental, dificultando a análise.

Quando for detectada a presença de barras quebradas, deve-se avaliar economicamente e tecnicamente o que deve ser feito. Em muitos casos, apenas substitui-se a barra quebrada por outra do mesmo material ou similar. Deve-se ter cuidado para, caso não seja feita a substituição por barras do mesmo material, utilizar barras com resistividade igual ou inferior às originais, evitando-se assim problemas de superaquecimento.

### **2.2.2. Falhas Mecânicas**

As falhas mecânicas, podem ser provocadas por fatores internos como, por exemplo, defeitos em rolamentos, e por fatores externos como a influência da fixação do motor a base. (MENEGAT, 2014)

#### **2.2.2.1. Folga de fixação do motor**

Uma fixação inadequada, promoverá a amplificação das frequências de vibração natural do motor. Estas amplificações consequentemente afetam todos os componentes do motor o degradando de forma prematura (AGOSTON, 2015). De forma resumida, problemas de fixação são resumidas em 3 tipos nas figuras a seguir podemos ver exemplos espectrais sintomatológicos de cada tipo de folga.

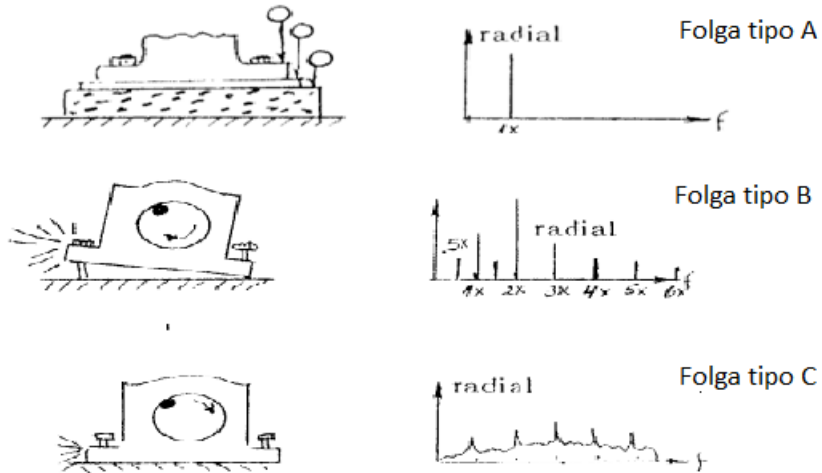


Figura 11: Sintomatologia espectrais de folgas

Fonte: Próprio autor

Na figura abaixo podemos ver o sinal da corrente no domínio da frequência (frequência [Hz]/ corrente [dB]), com zoom entre 0 e 120 Hz. Os picos indicados estão próximos às frequências 31,08 e 88,86 Hz, relacionadas a folga de fixação nos pés do motor.

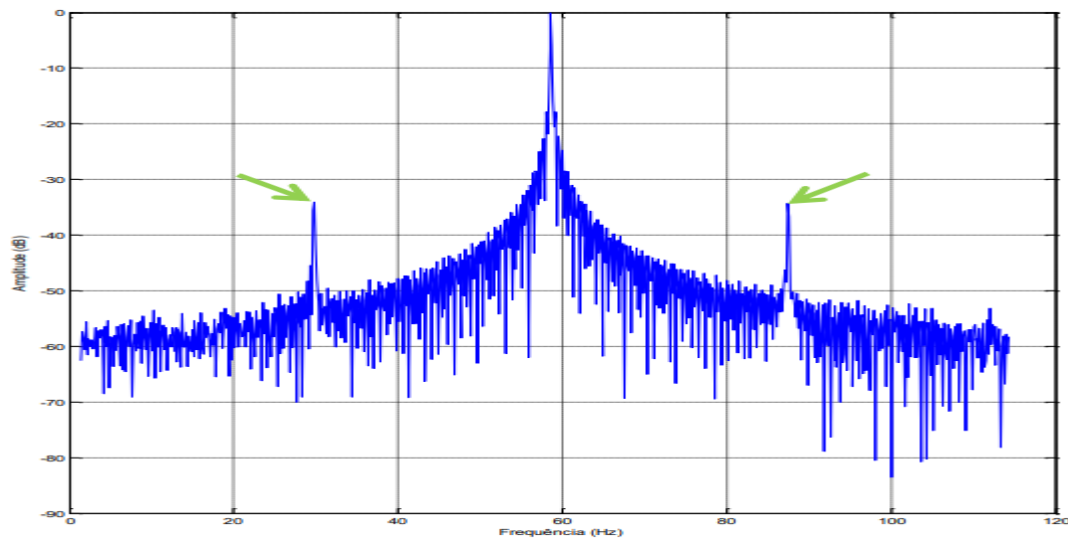


Figura 12: Espectros de folga mecânica em sinal de corrente

Fonte: (AGOSTON, 2015)

### 2.2.2.2. Vibração nos rolamentos

As falhas nos rolamentos representam em torno de 40% das falhas nos motores de indução. Diversos são os fatores que podem provocar o desgaste deste componente, entre eles destacam-se sobrecarga, desalinhamento e montagem incorreta. Assim como também o desgaste por partículas abrasivas, desgaste por lubrificação inadequada, desgaste por vibração, desgaste por penetração de umidade e descargas de corrente elétrica sobre o rolamento.

Os diagnósticos de defeitos em rolamento estão vinculados a geometria do rolamento e a frequência de rotação do rotor, produzindo componente relacionadas as frequências de vibração para cada tipo de falha. As equações determinantes da frequência de falha nos rolamentos consideram a sua forma construtiva, a figura detalha essas dimensões utilizadas no cálculo.

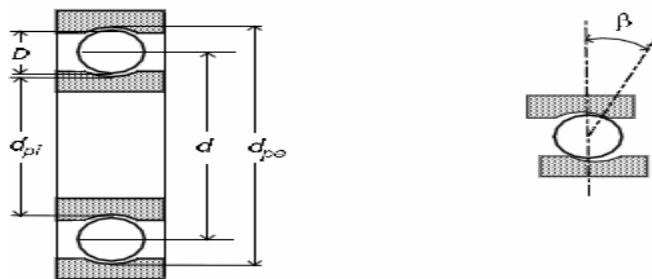


Figura 13: Dimensões utilizadas para o cálculo

Fonte: (SKF S. , 2000)

Onde,

D = diâmetro da esfera;

d = diâmetro primitivo;

d<sub>pi</sub> = diâmetro da pista interna;

d<sub>pe</sub> = diâmetro da pista externa;

β = ângulo de contato;

Ne = Velocidade de Rotação

As frequências de defeitos do rolamento são calculadas com recursos as seguintes equações matemáticas:

$$Fg = \frac{Fpe}{2} \left(1 + \frac{D \cos \beta}{d}\right) \quad (2.10)$$

$$BPFI = \frac{NeFpe}{2} \left(1 + \frac{D \cos \beta}{d}\right) \quad (2.11)$$

$$BPFO = \frac{NeFpe}{2} \left(1 - \frac{D \cos \beta}{d}\right) \quad (2.12)$$

$$FFT = \frac{dFpe}{2D} \left(1 + \frac{D^2 \cos^2 \beta}{d^2}\right) \quad (2.13)$$

Exemplos a seguir mostram espectros de análise de corrente e vibração de falhas de rolamento, para cada componente do rolamento tem a sua frequência natural que depende da sua massa e rigidez.

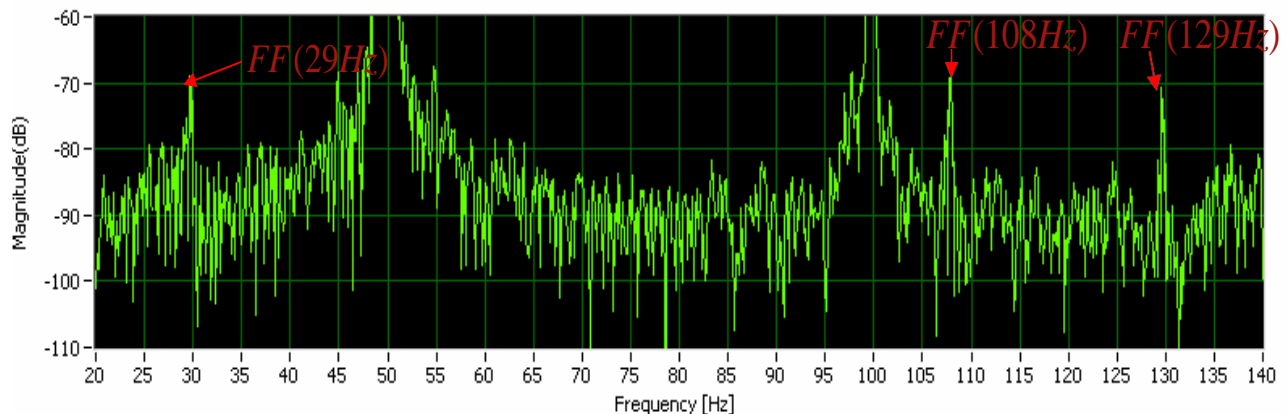


Figura 14: Espectro de sinal de corrente do motor defeituoso com furo de 4mm na pista interna

Fonte: (MAHELA, 2010)

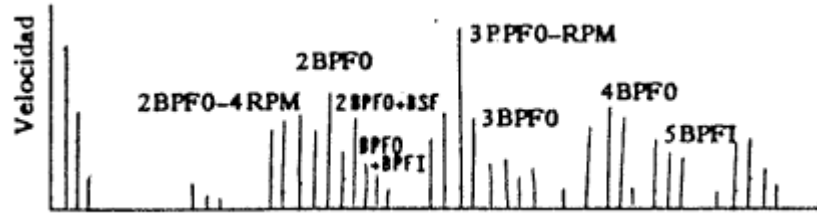


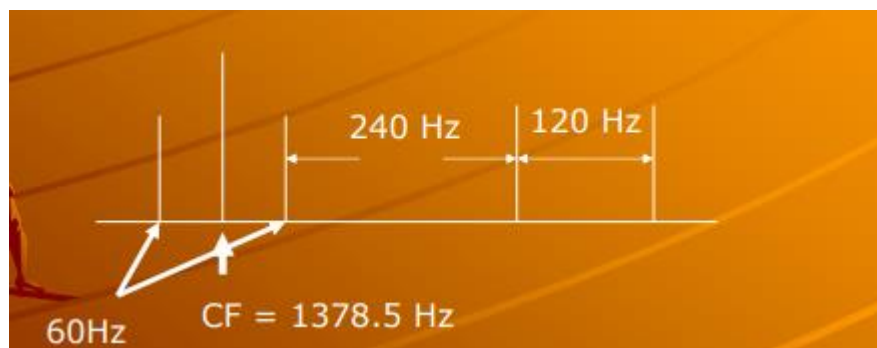
Figura 15: Espectro sintomatológico de defeito no rolamento em análise de vibração

Fonte: (AGOSTON, 2015)

### 2.2.2.3. Desbalanceamento do motor

Esta falha principalmente está relacionada a variação da excentricidade de um equipamento ou componente acoplado ao eixo do motor. Este defeito afeta principalmente os rotores dos motores. (AGOSTON, 2015)

Em análise de corrente, o desbalanceamento mecânico é encontrado através da determinação das barras do rotor vezes a velocidade de rotação, como em exemplo descrito em (Penrose) um exemplo de um motor com 47 barras, será determinado de seguinte maneira: 47 barras vezes 29.33 Hz é 1378,5 Hz. Haverá linha bandas laterais de frequência em torno da frequência central, em seguida, um espaço de 4 vezes linha frequência, dois picos de frequência de linha duas vezes. Num sistema de 60 Hz, este aparecerá como 120 Hz e 240 Hz. (Bonaldi, 2005)



### 2.2.2.4. Desalinhamento

A vibração associada ou desalinhamento tem uma característica peculiar, pois o acoplamento do eixo possui a capacidade de absorver o desalinhamento e devido a isso, a

vibração só se manifesta quando as forças provocadas pelo desalinhamento são transmitidas ao rotor e mancais sob a forma de pré-carga.

Os principais problemas sob o aspecto de pré-carga em máquinas rotativas são: desalinhamento angular, paralelo ou ambos; acoplamento defeituoso; desalinhamento entre mancais ou engrenagens entre outros. (Bonaldi, 2005)

Em análise de corrente, O desalinhamento produz harmônicas laterais em torno da frequência de alimentação dadas por

$$f_{mis} = (f_e \pm kfr) \quad (2.14)$$

Sendo que:

$f_r$  a frequência de rotação do rotor.

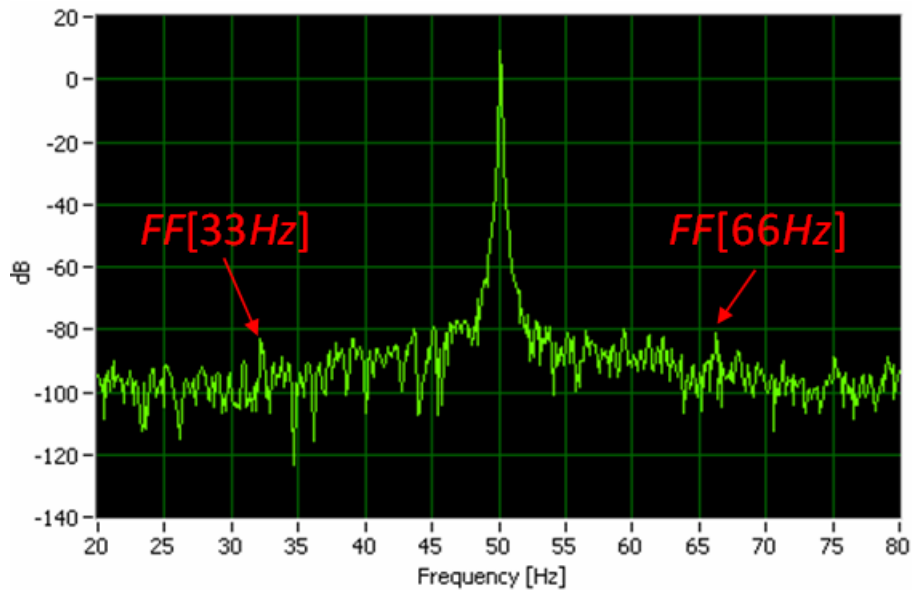


Figura 16: Espectro característico de desalinhamento em MCSA

Fonte: (MAHELA, 2010)

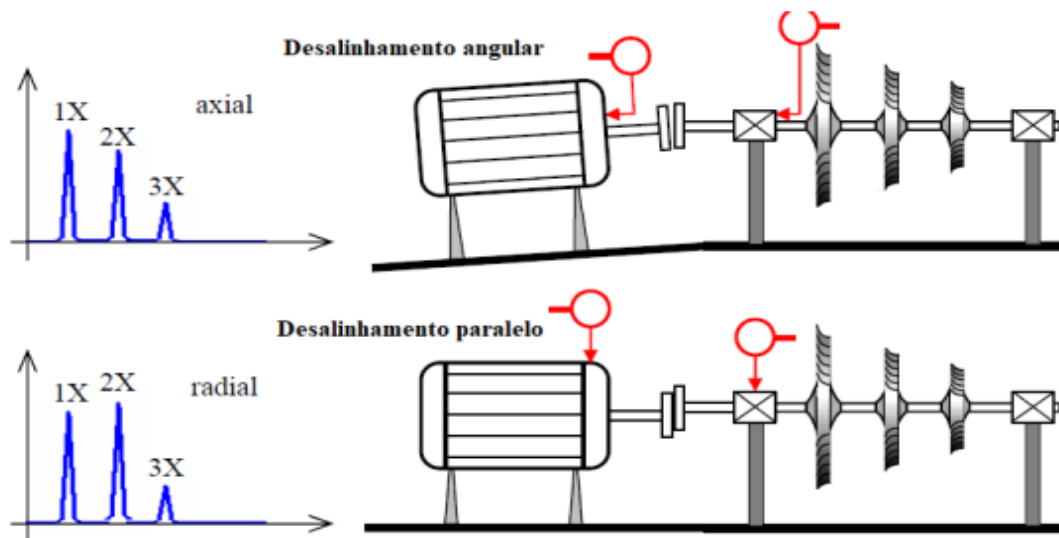


Figura 17: Espectro característico de desalinhamento

Fonte: (MAHELA, 2010)

### 2.3. Métodos de detecção de falhas em motores de indução trifásicos

Neste subtítulo serão apresentadas algumas técnicas relevantes para detecção de falhas que incidem sobre motores de indução.

(Pinheiro, 2011), reitera que para detectar as falhas nos motores de indução, muitos métodos foram desenvolvidos até então, envolvendo diferentes campos da ciência e tecnologia. Entre eles destacam-se aqui, os seguintes:

1. Monitoramento por vibração;
2. Monitoramento por emissão acústica;
3. Monitoramento do campo magnético;
4. Monitoramento por temperatura;
5. Monitoramento por pulso de choque;
6. Monitoramento de flutuação de velocidade;
7. Monitoramento da assinatura elétrica (MCSA);
8. Monitoramento de emissão de rádio-frequência;
9. Análise química.

(BONALDI, SILVA, TORRES, & OLIVEIRA, 2002) informa que cada um deles tem seus méritos e deméritos, será apenas detalhada os métodos enfoque da pesquisa.

### 2.3.1. Análise de Assinatura de Corrente do Motor (MCSA)

Segundo (Pinheiro, 2011), define a técnica de MCSA como não-invasiva capaz de monitorar o motor em tempo real, e consiste na utilização dos resultados da análise espectral do sinal de corrente de uma das fases do estator. Quando uma falha está presente, o espectro da corrente de linha torna-se distinto em comparação com aquele que representa o motor saudável. Tais falhas modulam o entreferro e produzem frequências harmônicas girantes nas indutâncias próprias e mútuas da máquina. Desde que o fluxo concatenado oscile somente na frequência da fonte, aquelas indutâncias harmônicas produzem no estator uma corrente com harmônicas localizadas em cada lateral da frequência fundamental.

Segundo (REIS, 2010), as técnicas não-invasivas são aquelas baseadas em medições que não necessitam interromper nem desmontar o motor para a coleta de informações. Já as técnicas invasivas precisam ter acesso ao motor para coletar os dados necessários à análise.

A aquisição desse espectro acontece a partir da coleta do sinal da corrente no domínio do tempo com sua posterior transformação para o domínio da frequência, conforme a Figura 18.

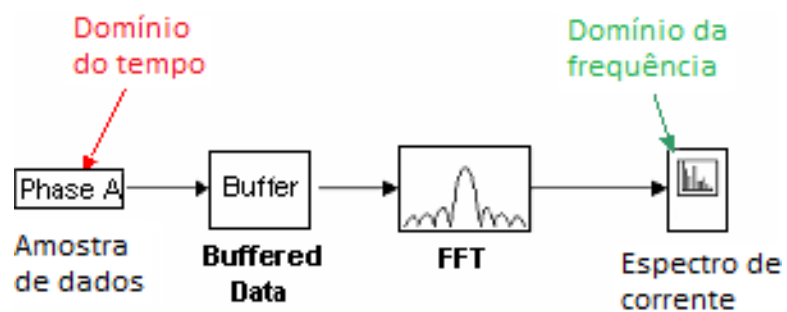


Figura 18: Esquema para a determinação do espectro da corrente

Fonte: (GAZZANA, 2004)



Entre as possíveis falhas que a MCSA pode diagnosticar estão: assimetria do rotor, rotor desbalanceado, barras quebradas do rotor, danos nos rolamentos, curtos entre bobinas do estator e excentricidade do entreferro.

Quando uma assimetria está presente no rotor, a densidade de fluxo no entreferro é distorcida. Esta distorção gira à velocidade do eixo, gerando uma componente característica no espectro de frequência. No caso da excentricidade dinâmica que varia com a posição do rotor, o que acontece é uma oscilação no comprimento do entreferro, causando variações do fluxo ali existente, afetando a indutância instantânea da máquina e produzindo harmônicas na corrente do estator.

No caso da excentricidade do entreferro, há dois métodos para a detecção. No primeiro, monitora-se o comportamento das faixas laterais próximas da frequência de ranhura. Como desvantagem, existe a necessidade de conhecer aspectos construtivos da máquina. O segundo, consiste em monitorar o comportamento das faixas laterais em torno da frequência fundamental, o que pode suprir a deficiência do primeiro.

No caso de defeitos nos rolamentos, a formulação depende de suas dimensões físicas, e no caso de curto-circuitos nos enrolamentos do estator, existem componentes harmônicos específicos que caracterizam esta falha.

Segundo (BONALDI, SILVA, TORRES, & OLIVEIRA, 2002), destaca a tabela da severidade como padrão para analisar as frequências determinísticas para análise de barras quebradas.

| Nível de Severidade | Diferença em dB | Condição do rotor  | Ação recomendada    |
|---------------------|-----------------|--|---------------------|
| 1                   | >60             | Excelente  | Nenhuma             |
| 2                   | 54-60           | Bom  | Nenhuma             |
| 3                   | 48-54           | Moderado   | Verificar tendência |
| 4                   | 42-48           | Possibilidade de barra trincada com pontos de alta resistência | Atenção (MCSA)      |
| 5                   | 36-42           | 1 ou 2 barras provavelmente trincadas ou quebradas             | Atenção (MCSA)      |
| 6                   | 30-36           | Múltiplas barras trincadas ou quebradas                        | Reparo              |
| 7                   | <30             | Múltiplas barras trincadas ou quebradas e anel de curto        | Reparo              |

Figura 19: Tabela de severidade para barras quebradas  
 Fonte: (Bonaldi, 2005)

### 2.3.2. Análise de Vibração

A análise de vibração do motor de indução pode ser realizada com acelerômetros colocados nos rolamentos nas direções vertical, axial e radial. Trata-se, portanto, de um método invasivo, que requer a parada do motor para colocação dos sensores e apresenta custo elevado.

A análise de vibração do motor é capaz de fornecer informações sobre praticamente todas as falhas mecânicas, visto que determinados defeitos produzem vibrações características, que podem ser comparados com valores referenciais.

De acordo com (ROLAND, 2003), os componentes de frequências, que permitem identificar defeitos, dependem da frequência de rotação do rotor. Por conseguinte, os resultados fornecidos podem, muitas vezes, se tornar de difícil análise, impossibilitando distinguir diferentes falhas, dada sua necessidade de possuir valores referenciais para comparação.

#### 2.3.2.1. Avaliações das vibrações

A avaliação das vibrações pode ser feita em dois níveis:

- ✓ **Medição de nível global:** determinação do estado geral de um equipamento. É a

somatória do modo de vibração de todos os componentes, a partir dos valores de crista, pico a pico, eficaz e médio.

- ✓ **Análise de Espectros:** cada componente da máquina possui seu próprio trem de frequências. A estratificação das frequências elementares que compõem todo o sinal complexo permite a identificação de cada componente. Esta estratificação é normalmente feita por meio de tratamentos matemáticos. Os instrumentos atuais executam este trabalho automaticamente utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

- 

#### **2.3.2.2. Curvas de tendência**

Como já visto, nível global de vibração é a somatória de todas as frequências de um determinado intervalo definido pelo usuário e assim, podem-se registrar estes valores ao longo do tempo através da curva de tendência (FUPAI, 2002).

A curva de tendência é utilizada para observação da evolução do nível global de vibração. Assim é possível verificar o comportamento vibratório da máquina ao longo das diversas inspeções. (FUPAI)

#### **2.3.2.3. Mapas Espectrais**

O espectro de frequências é uma das técnicas mais comuns para a detecção e diagnósticos das avarias mais frequentes. (FUPAI, 2002)

Os mapas espectrais são a conjugação de um conjunto de espectros que permitem verificar qual tem sido o comportamento do ponto em análise, ao longo das sucessivas inspeções e em condições idênticas de velocidade e rotação e carga. (FUPAI, 2002)

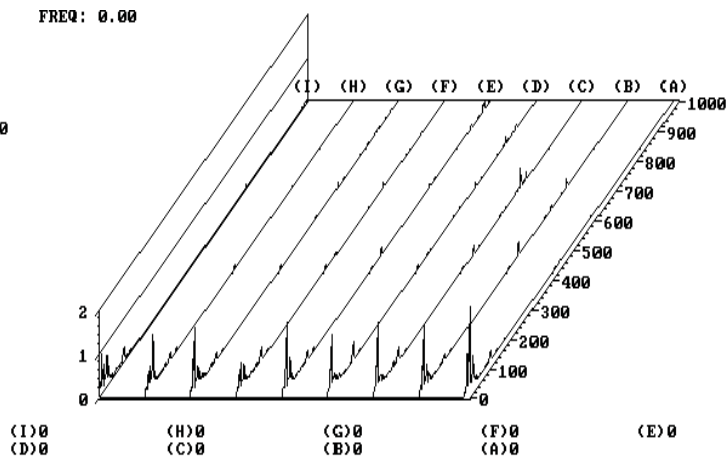
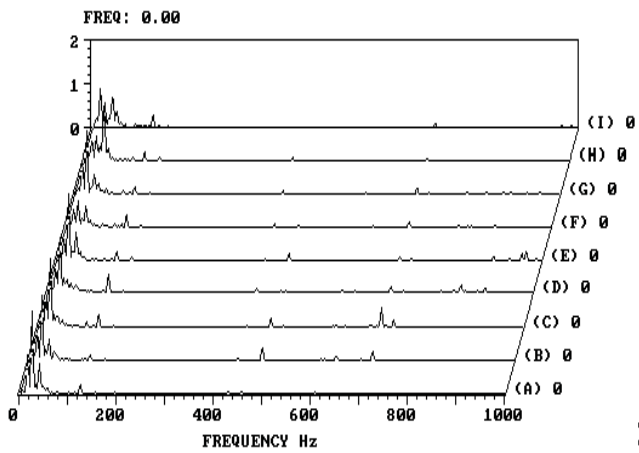


Figura 20: Exemplos de Mapa Espectral

Fonte: (FUPAI, 2002)

## CAPITULO III: MEMORIAL DESCRITIVO E JUSTIFICATIVO

### 3.1. Descrição da empresa empregadora e a unidade fabril

As actividades do estágio foram realizadas no Porto (planta industrial) do Corredor Logístico Integrado de Nacala.

#### 3.1.1. Descrição da empresa ICRO Mozambique

ICRO Mozambique é uma empresa subsidiária da ICRO soluções esta pela qual esta instalada em Brasil e Portugal, prestadora de serviços industrial e tem como unidades de negócios em 3 unidades fabril em moçambique, tem como realização de serviços de Prognósticos para a gestão da manutenção industrial através de técnicas preditivas integradas, assessoria à gestão da manutenção, procedimentos para o setup e conservação de ativos e diagnóstico e implementação do programa de gestão de ativos industriais.

#### 3.1.2. Descrição da unidade fabril – Porto do Corredor Logístico Integrado de Nacala

O processo industrial do porto da CLN é constituído por máquinas totalmente automatizadas para o processo de estocagem e embarcação do carvão, e destacam-se as seguintes máquinas:

**Virador de vagões (VV-3120NA-01):** Responsável por virar os vagões, saindo da unidade de fabril de Moatize, faz parte do circuito do processo de descarga. Esta máquina é composta por sistema de giro, carro posicionador, sistemas hidráulicos, alimentadores de sapatas e transportadores de finos e o sistema de aspersão;

**Empilhadeiras (EP-3140NA-01 e 02):** Responsáveis pelo empilhamento de carvão no pátio de estocagem, faz parte do circuito do processo de descarga. Estas máquinas são compostas por sistema de giro, sistema de elevação, sistema de translação, enrolador de cabo de força e a transportadora de lança;

**Recuperadoras (RC-3140NA-01 e 02):** Responsáveis pela recuperação do material no pátio para a embarração, faz parte do circuito do processo de embarque. Estas máquinas são compostas por sistema de giro, sistema de elevação, sistema de translação, enrolador de cabo de força, transportadora de lança e a roda de caçamba.

**Carregadores de Navio (CN-3220NA-01 e 02):** Responsáveis por descarregar o carvão nos porrões dos navios, faz parte do circuito do processo de embarque. Estas máquinas são compostas por sistema de giro, sistema de elevação, sistema de translação, enrolador de cabo de força, transportadora de lança e a telescópica.

Sublinhar que os activos que constitui as máquinas, transportadora e as bombas hidráulicas são acionados por motores de indução trifásico.

No âmbito eléctrico, usualmente o Porto é alimentado pela concessionária EDM, recebendo a linha aérea com nível de tensão de 110 kV na sua subestação principal e transformado em 22 kV, como contingência o Porto está equipado com uma planta de cogeração (Mini usina termoelétrica) gerando 8 MW possuindo 10 grupos geradores. O porto é dotado de um sistema eléctrico em anel e subdividem-se em Subestações secundarias (responsáveis pela alimentação das máquinas, transportadora e demais activos do processo industrial) transformando a tensão em 3.3 kV, 660 V e 380 V e mini – subestações (responsável pela alimentação das utilidades, blocos administrativos, iluminação, clinica e restaurante). O porto possui quatro (4) subestações secundarias, destacando:

- ✓ **SE – 3120NA – 01:** Subestação responsável pela alimentação geral do virador de vagões;
- ✓ **SE – 3140NA -01:** Subestação responsável pela alimentação das correias transportadoras do pátio;
- ✓ **SE – 3140NA – 02:** Subestação responsável pela alimentação das empilhadeiras e recuperadoras;
- ✓ **SE – 3140NA – 03:** subestação responsável pela alimentação de correias transportadoras do pátio e pier;
- ✓ **SE – 3220NA – 01:** Subestação responsável pela alimentação dos carregadores de navio.

As transportadoras do porto são constituídas por motores de indução de trifásica,

tambores, roletes e correia de borracha. Estes motores são alimentados pelas subestações secundárias, em termos de controlo elas possuem controlo local (usual apenas em manutenção) em cada transportadora é dotada de um (1) painel para o controlo local, e o controlo automático (usual em operação) este é manipulado pela equipe de CCO responsáveis pela operação. Os motores das transportadoras são acionados por VSD's enquanto os motores das máquinas são acionados em partida directa em delta (DOL). Na figura a esta patente o layout do porto da CLN

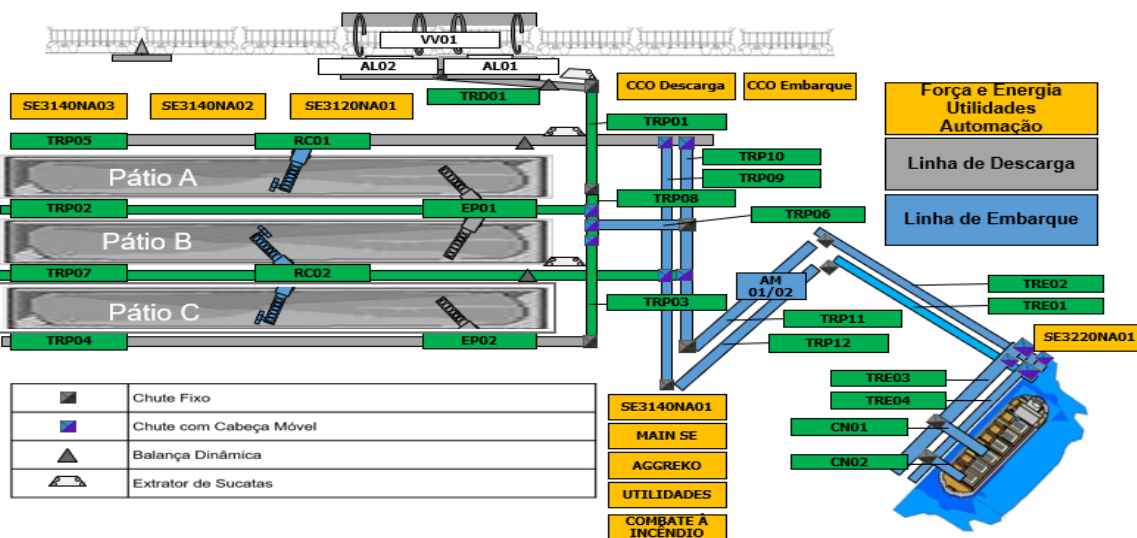


Figura 21: Layout da unidade fabril - Porto da CLN

Fonte: ICRO Mozambique

### 3.2. Falhas comuns no porto da CLN

No Porto da CLN é comumente haver indisponibilidade dos ativos que comprometem a produção, em especial os MIT devido as falhas que estes motores têm apresentado, foi assim levantado as falhas mais comuns e destacam-se as seguintes:

- ✓ **Defeitos de rolamentos;**
- ✓ **Desalinhamento de eixos (motor – carga);**
- ✓ **Desbalanceamento mecânico (têm causado excentricidade no rotor);**

- ✓ **Folga mecânica nos pés do motor;**
- ✓ **Curto-circuito no estator e quebra de barras do no rotor;**

Em um levantamento feito pela empresa ICRO Mozambique mostra que os defeitos de rolamentos e desalinhamento nos eixos detém maior percentagem das falhas dos motores no Porto, a figura abaixo mostra um rolamento com início de defeito.

### **3.3. Falhas do MIT nos espectros de vibração e corrente do porto da CLN**

No âmbito da recolha de dados, foram realizadas as colecta de dados de vibração e corrente, será demonstrado em gráficos espectrais das falhas ou início de falhas encontradas em diferentes ativos (MIT) do Porto.

#### **3.3.1. Espectros de vibração**

Para os dados de vibração foram realizadas coletas em diferentes activos com funcionalidades diferentes no processo.

##### **3.3.1.1. Espectro de vibração do motor da transportadora TR-3220NA-03 com falha da pista externa no rolamento dianteiro**

O motor apresentava ruído e temperatura elevada na parte dianteira do motor, o motor possui os seguintes dados nominais:

*Tabela 1: Dados nominais do motor da transportadora TR-3220NA-03*

| P <sub>n</sub> (kW) | U <sub>n</sub> (V) | I <sub>n</sub> (A) | F <sub>al</sub> (Hz) | N (rpm) | Referencia do Rol. dianteiro |
|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------|------------------------------|
| 1000                | 3300               | 210                | 50                   | 1491    | 6328CC                       |

Fonte: Próprio autor

A medição feita na parte dianteira do motor apresentou o seguinte gráfico espectral:



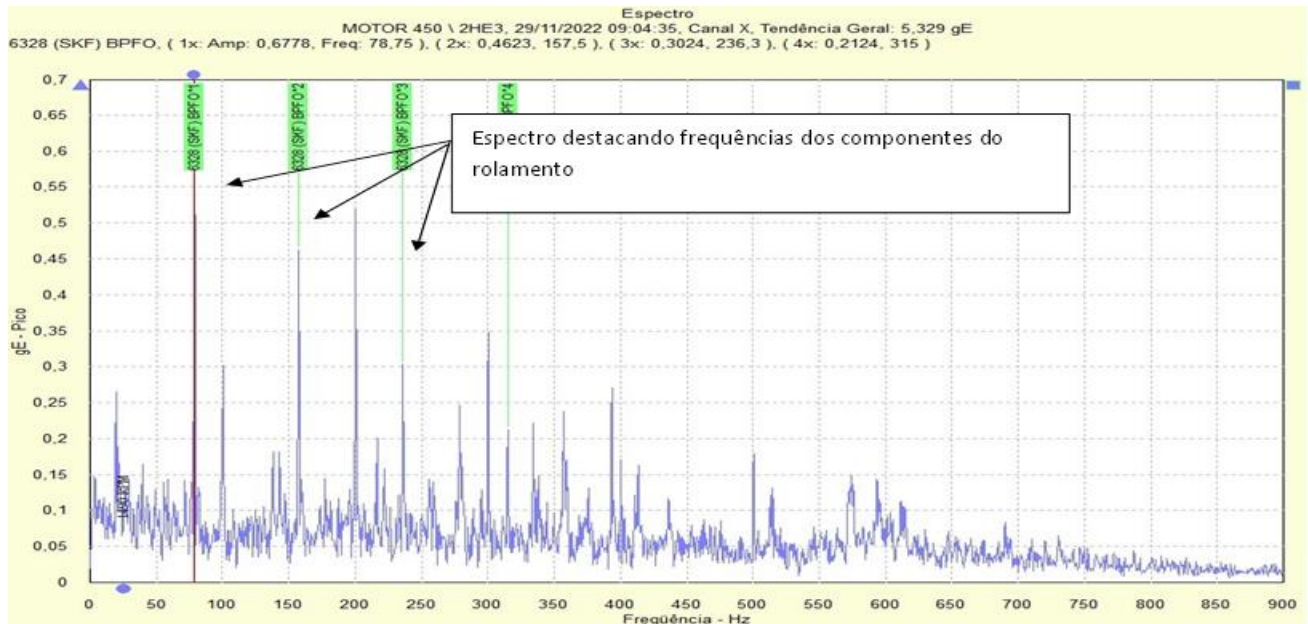


Figura 22: Espectro de vibração do motor da transportadora TR-3220NA-04

Fonte: próprio autor

As frequências dos componentes são calculadas usando as equações (2.10) a (2.13), mas devido a falta de dados construtivos do rolamento será usado a calculadora da SKF, veja anexo - 1 o passo a passo do cálculo das frequências dos componentes do rolamento do motor.

### 3.3.1.2. Espectro de vibração do motor-redutor de cabo de força da RC-3140NA-01 com folga de fixação na saída do motor

A equipe de campo notou batimentos/impactos internos excessivo no motor e solicitaram uma análise espectral, o motor apresenta como dado nominal de velocidade de 1490 rpm e o motor apresenta o seguinte espectro:

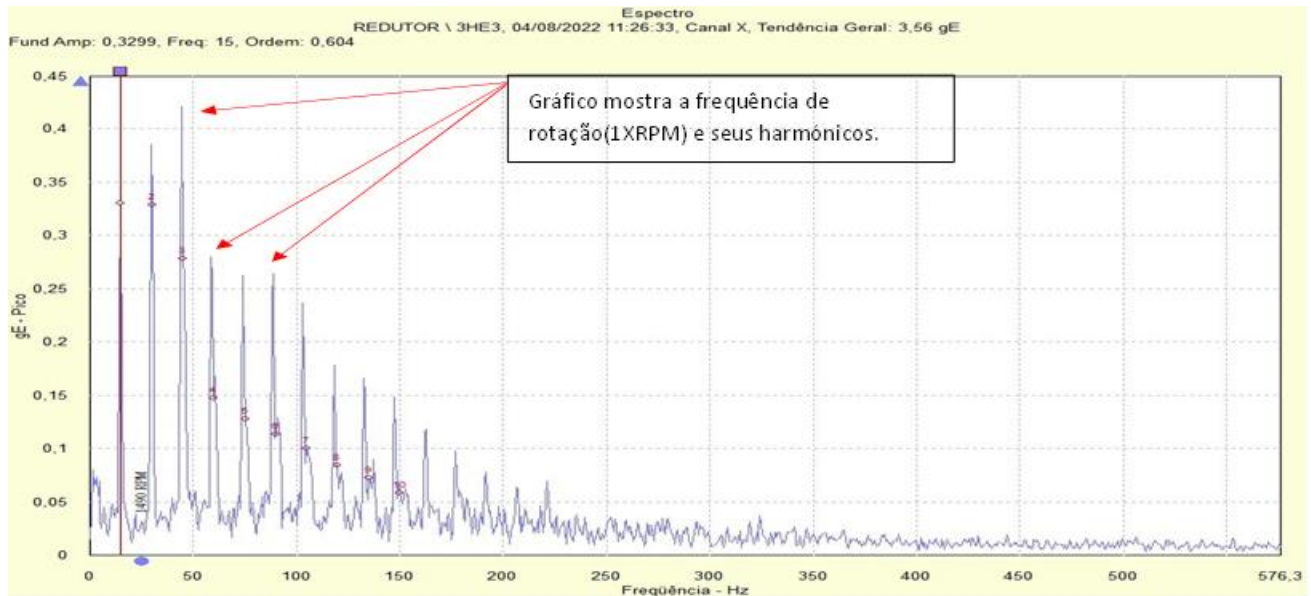


Figura 23: Espectro de vibração do motor-redutor do cabo de força da RC-3140NA-01

Fonte: Próprio autor

### 3.3.1.3. Espectro de vibração do motor da bomba de aspersão do VV-3120NA-01 com desalinhamento paralelo

A bomba de aspersão apresentava de forma sensível alto nível de vibração, foi realizada a coleta e apresentou o seguinte espectro:

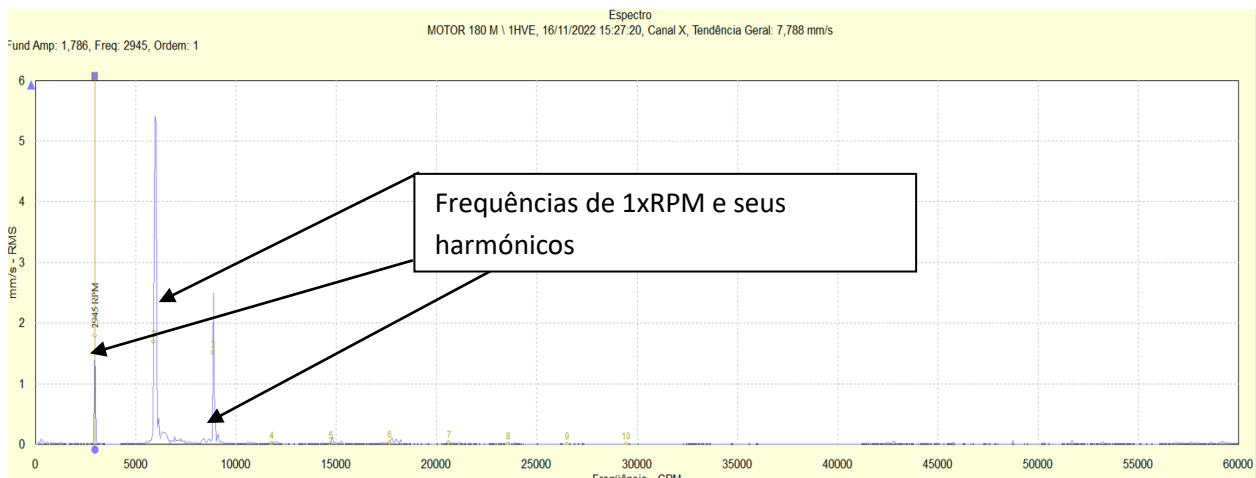


Figura 24: Espectro de vibração do motor da bomba de aspersão do VV-3120NA-01

Fonte: próprio autor

### 3.3.1.4. Espectro de vibração do motor da bomba hidráulica de elevação da lança da EP-3140NA-01 com início de uma falha eléctrica desconhecida

Foi realizado a colecta no motor da bomba hidráulica, e esta apresenta o seguinte espectro:

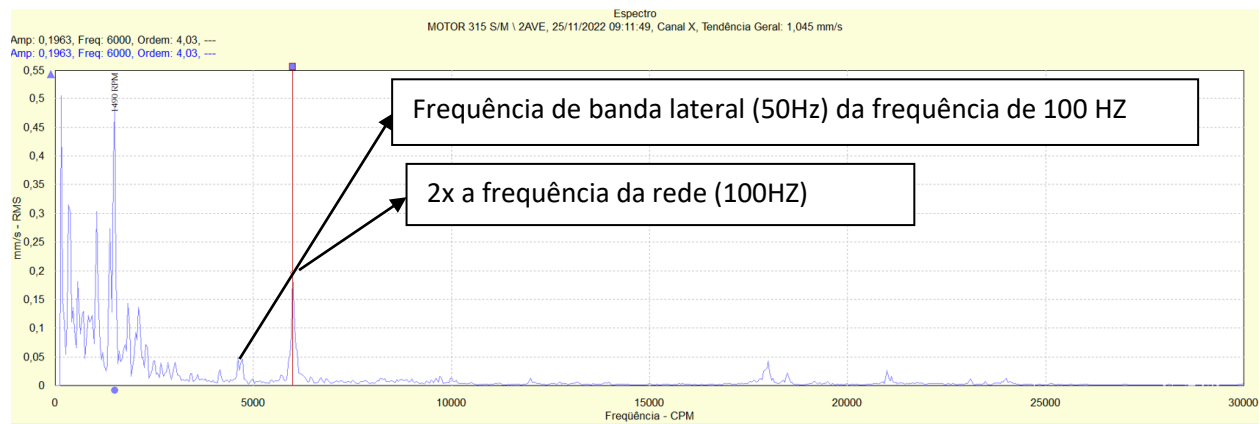


Figura 25: Espectro de vibração do motor da bomba hidráulica de elevação da lança da EP-3140NA-01

Fonte: próprio autor

### 3.3.1.5. Espectro de vibração do motor da transportadora da lança do CN-3220NA-01

Durante as coletas rotineiras, foi realizado a coleta no motor da transportadora da lança, este apresenta o seguinte espectro:

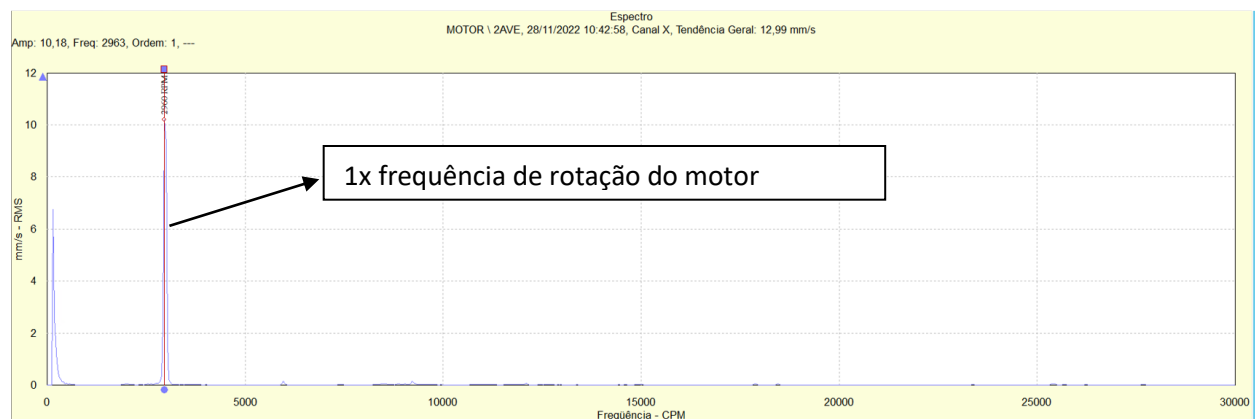


Figura 26: Espectro de vibração do motor da transportadora da lança do CN-3220NA-01

Fonte: próprio autor

### 3.3.2. Espectro de análise de assinatura de corrente

Os espectros a seguir foram coletados em duas instâncias:

1. O motor apresentava ruído no momento da partida, houve a suspeita de início de defeito elétrico e recorreu-se a análise de assinatura de corrente para o seu diagnóstico;
2. Após o diagnóstico, houve mudança do motor e foi realizada a nova coleta.

A coleta foi realizada em um Motor-bomba pertencente ao sistema de aspersão no pátio da unidade fabril Vulcan, o motor possui os seguintes dados nominais:

*Tabela 2: Dados nominais do motor do sistema de aspersão*

| $P_n$ (kW) | $U_n$ (V) | $I_n$ (A) | $F_{al}$ (Hz) | $N$ (rpm) |
|------------|-----------|-----------|---------------|-----------|
| 75         | 380       | 75.4      | 50            | 1480      |

Fonte: próprio autor

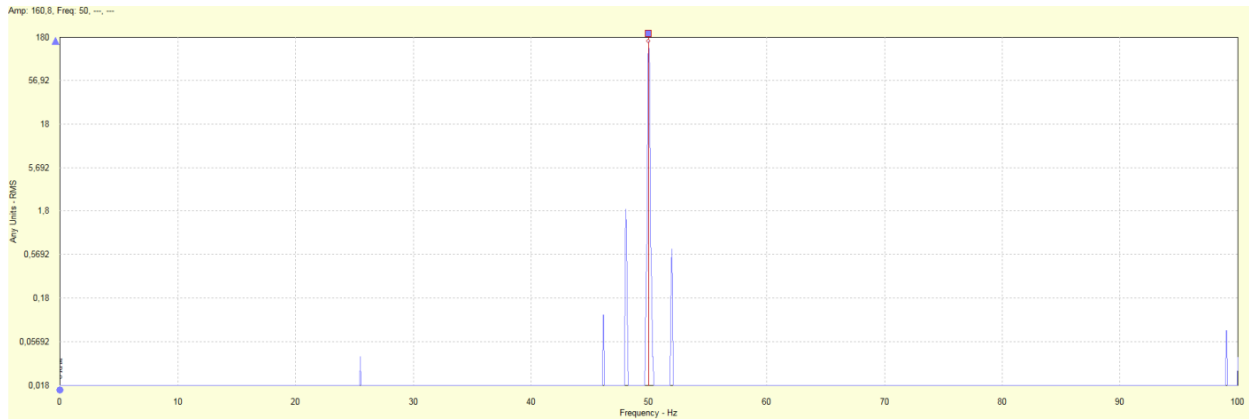
### Cálculo das possíveis frequências de defeito de barras rompidas

Com o auxílio da equação (2.9) podemos efetuar o cálculo das frequências de bandas laterais para confrontar com as frequências encontradas no espectro de assinatura de corrente

Para o cálculo será necessário o valor do escorregamento e será calculado com o auxílio da equação (2.2), sendo assim:  $S = \frac{n_{sin} - n_m}{n_{sin}} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0.013333$

Para  $K = 1$ , será efetuada o calculado a frequência da banda lateral esquerda,  $f_{bq} = f_f(1 \pm 2ks) = 50 * (1 - 2 * 1 * 0.0133) = 48.66 \text{ Hz}$ , espera-se encontrar no espectro uma frequência de banda lateral esquerda igual ou próxima a 48.66 Hz.

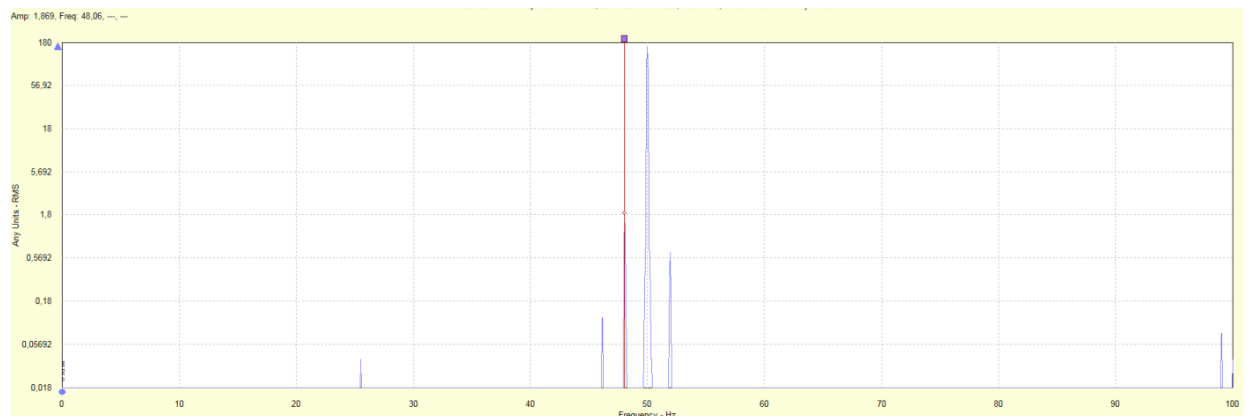
### 3.3.2.1. Espectros de sinal de corrente do motor removido



*Figura 27: Espectro de sinal de corrente do motor sinalizando a frequência fundamental do motor novo*

Fonte: próprio autor

O espectro apresentado nota-se a presença da frequência de 50 Hz que é fundamental para as nossas análises, esta frequência apresenta uma amplitude de 160.8 A, assim necessitamos conhecer o valor de amplitude de uma das frequências das bandas laterais para a análise de severidade. Os valores da amplitude estão na unidade de corrente, sendo assim devem ser transformados em amplitudes de dB devido a forma de análise adotada no projecto.



*Figura 28: Espectro de sinal de corrente do motor sinalizando a frequência de banda lateral do motor removido*

Fonte: próprio autor

Nesse espectro nota-se a frequência da banda lateral esquerda com valor de 48.06 Hz próxima a 48.66 Hz, com uma amplitude de 1.869 A.

### Cálculo da diferença da amplitude em dB

$$dB = \log \frac{160.8}{1.869} = 38.7 \text{ dB}$$

### 3.3.2.2. Espectro de sinal de corrente do motor novo

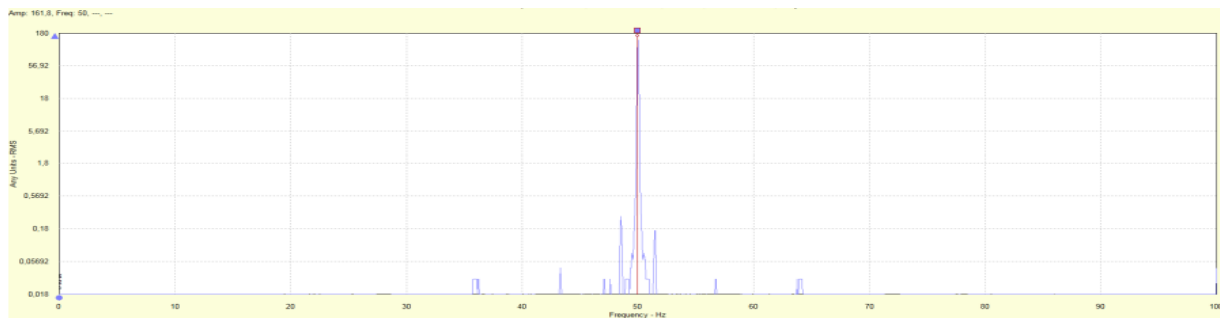


Figura 29: Espectro de sinal de corrente do motor sinalizando a frequência fundamental do motor novo

Fonte: próprio autor

O espectro apresentado nota-se a presença da frequência de 50 Hz que é fundamental para as nossas análises, esta frequência apresenta uma amplitude de 161.8 A.

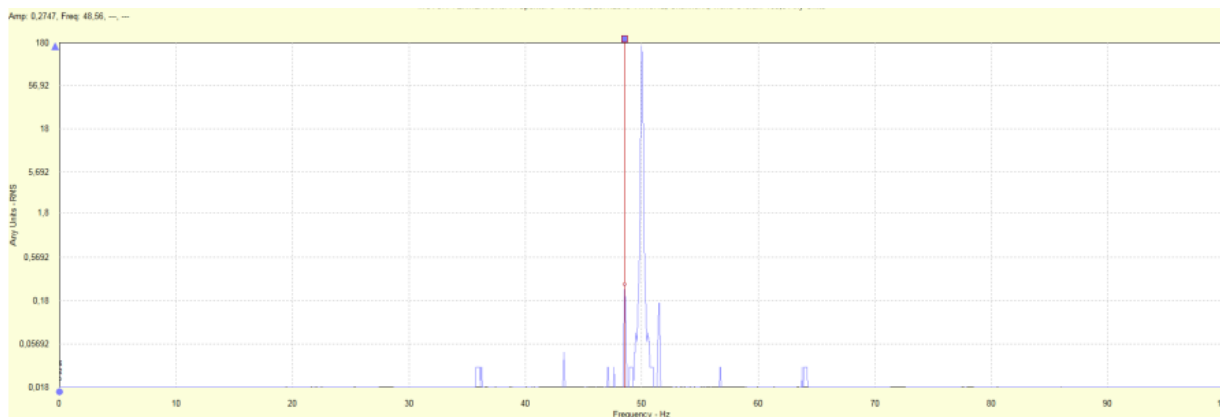


Figura 30: Espectro de sinal de corrente do motor sinalizando a frequência de banda lateral do motor novo

Fonte: próprio autor

Nesse espectro nota-se a frequência da banda lateral esquerda com valor de 48.06 Hz próxima a 48.66 Hz, com uma amplitude de 0.2747 A.

### Cálculo da diferença da amplitude em dB

$$dB = \log \frac{161.8}{0.2747} = 55.4 \text{ dB}$$

### 3.4. Análise dos dados espectrais

Para o **espectro de vibração do motor da transportadora TR-3220NA-03**, o espectro apresenta a frequência de excitação da pista externa e os seus harmônicos do rolamento dianteiro do motor, sendo assim afirma-se haver defeito de rolamento, o motor foi a oficinas e notou-se a passagem de corrente elétrica no rolamento causando a electro-erosão.



*Figura 31: Rolamento danificado*

Fonte: próprio autor

Para o **espectro de vibração do motor-reductor do cabo de força da RC-3140NA-01**, o espectro apresenta a frequência de rotação do motor em 1Xrpm e seus harmônicos até 10xrpm, essa característica espectral é de folgas do tipo C, em campo notou-se que o motor foi instalado por flange, e os parafusos de fixação do motor e reductor já estão oxidados e frouxos.

Para **espectro de vibração do motor da bomba de aspersão do VV-3120NA-01**, o espectro apresenta frequências de 1xrpm, 2xrpm e 3xrpm, característica sintomatológica esta de desalinhamento paralelo devido a alta amplitude da frequência de 2xrpm em relação as outras, no campo percebeu-se que a base do motor esta oxidada, veja a seguir a evidencia fotografica da base.



*Figura 32: Base do motor oxidada*

Fonte: próprio autor

Para o **espectro de vibração do motor da bomba hidráulica de elevação da lança da EP-3140NA-01**, houve imensas dificuldades de apurar um diagnostico usando a sintomatológica espectral, mas a frequência de 2xfrequencia da rede e bandas laterais de 50 Hz mostra o início de falha elétrica não reconhecível provavelmente seja uma falha estátorica, como recomendação deve-se realizar uma análise espectral usando o método de analise



de assinatura de corrente do motor.

Para o **espectro de vibração do motor da transportadora da lança do CN-3220NA-01**, nota-se no espectro o aparecimento de 1xrpm, frequência determinística de desbalanceamento de massa, na inspeção visual do motor nota-se a quebra de algumas pás da hélice de refrigeração e acúmulo de material nas pás existente, assim assume-se que o motor está trabalhando desbalanceado, será necessário ser feita troca da hélice para melhorar a eficiência energética do activo.

Para o **espectro de sinal de corrente do motor removido**, de acordo com a tabela de severidade para análise de barras rompidas apresentada no capítulo II, podemos afirmar que o motor possui no seu rotor possivelmente duas barras rompidas/quebradas e a assertividade surge no diagnóstico feito no **motor novo** e com valor encontrado de dB podemos afirmar que não há barras quebradas.

Em termos comparativos, as análises dos resultados mostraram que a técnica de análise de vibração possibilitam o aparecimento de novas frequências no espectro, as quais não foram notadas no método de análise de assinatura de corrente do motor, isto foi observado na comparação entre os espectros de frequência resultante da aplicação das técnicas. É importante destacar que esta evidencia, no espectro de frequência, torna a detecção e o diagnóstico mais efetivo, isto porque aumenta a confiabilidade e a precisão da análise, por parte do “especialista”, em identificar a presença da falha.

### **3.5. Vantagens e desvantagens dos métodos em estudo**

A análise de vibração é o método usado na planta de CLN para monitoramento de condições dos motores da planta, mas este método apresenta deméritos analisando paralelamente com o método de análise de assinatura de corrente do motor, nesse contexto apresento uma comparação vantajosa e desvantajosa dos métodos, destacando os seguintes pontos:

1. **Colecta de dados em ambiente com vibrações externa:** muitos dos motores sofrem vibrações externas durante o seu processo, daí surge dificuldade na análise de dados de vibrações pelo facto da falta de discriminação das frequências externas

provenientes do ruído/vibrações externas. Como exemplo, o ruído que surge no momento de descarga ou carregamento do material. Contudo, o método de análise de corrente é eficaz nesse âmbito porque das possibilidades de um range menor de frequências e as frequências coletadas são das respostas dinâmicas do motor que influencia na corrente;

2. **Colecta de dados em carga/operação:** o método de análise de assinatura de corrente tem restrições na colectas de dados em carga devido a variações do escorregamento e para uma análise nítida é necessário que o escorregamento seja 100% da carga nominal;
3. **Detecção de falhas elétricas:** como já era de se esperar, o diagnóstico de problemas de origem elétrica é mais difícil de ser realizado pela análise de vibrações;
4. **Necessidade de análise de vários sinais:** na maioria das vezes o analista de vibração trabalha com sinais de vários acelerômetros instalados na máquina para se chegar ao diagnóstico do problema. Estes acelerômetros podem chegar ao total de nove ou mais nas posições horizontal, vertical e axial em dois ou três pontos. Já MCSA trabalha com apenas um sinal de uma das fases de corrente.
5. **Necessidade de acesso ao motor:** algumas vezes o motor está inacessível, outras vezes os motores se encontram em locais de pouca segurança para o técnico de colecta. A técnica de MCSA não precisa de acesso ao motor, mas apenas a coleta do sinal de corrente diretamente do painel de alimentação.

## **CAPITULO IV: CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES e RECOMENDAÇÕES**

### **4.1. Conclusões**

Este trabalho analisou duas técnicas de manutenção preditiva para diagnóstico de falha em motores de indução trifásico. Ao realizar as medições no equipamento de estudo e avaliar o comportamento das correntes de alimentação e as vibrações presentes durante a operação da máquina foi possível observar comportamentos nos níveis de vibração (mm/s) e dB's que evidenciaram anormalidade de funcionamento.

A escolha de activos a serem analisados no estudo foi com base em histórico de falhas de activos semelhantes que o Porto já teve, comungando assim com a importância do mesmo no processo produtivo

Os defeitos eléctricos não tiveram visibilidade no método de análise de corrente do motor como visto no capítulo II, as coletas feitas no motor no momento em carga criaram dificuldades no aparecimento das frequências importantes para o estudo e cria uma variação significativa do escorregamento, e não se recomenda colecta em vazio devido a fraca resposta dinâmica em frequência.

Em termos de análise de vibração, em algumas coletas nota-se que existe extrema vibração externa que cria uma perturbação do sinal colectado, fica difícil encontrar as frequências determinísticas devido as oposições do ruído nas frequências que pretendemos analisar.

Para o estudo, o método de análise de vibrações mostrou ser mais assertivo e com maior confiabilidade, tendo como os parâmetros de análise: a quantidade de falhas detectadas de forma incipiente e aparecimento de novas frequências e frequências eléctrica no espectro de vibração.

## 4.2. Limitações

A finalidade do estudo é de comparar dois métodos de monitoramento de condição para detecção de falhas incipientes em motores eléctricos de indução trifásico, não foi possível a realização de uma análise comparativa directa dos dois métodos sobre o mesmo activo devido a falta de uma estrutura para a coleta e análise de dados de corrente dos motores, então o estudo limitou-se na análise dos motores do Porto em dado de vibração e análise de assinatura de corrente de um activo presente na unidade fabril Vulcan – Tete.

## 4.3. Recomendações

Tendo em conta os deméritos e méritos notados em cada método e pela limitação do estudo, recomenda-se:

- a) A aquisição de uma estrutura/aparelho de colecta e análise de dados de corrente do motor;
- b) Dotar a planta de um monitoramento contínuo de forma online integrando na base de dados da instrumentação da planta, as análises de método MCSA devem ser feitos em carga a 100% garantido melhor visibilidade dos defeitos e com escorregamento constante, a variação constante do escorregamento cria a não assertividade de defeito de barras quebradas;
- c) Janelamento das frequências no momento de colecta de vibração, usando a ferramenta de envelope de modo a discriminar frequências não importantes para a análise;
- d) Alterar o plano de colecta de dados de vibração, ou seja, diminuir o intervalo de colecta para activos já identificado com uma falha eléctrica não conhecida.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AGOSTON, K. (2015). *Fault detection of the electrical motors based on vibration analysis*. Procedia Technology.
- AHMED, K. S. (2003). *Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal procesing electric*. Electric power system research.
- Bin Lu, V. C. (2009). *Monitoramento de Energia Online e Remoto e diagnósticos usando redes de sensores sem fio*. IEEE Transactions on Eletrônica Industrial, Volume 56.
- Bonaldi, E. L. (2005). *Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados*. Brasil: Universidade Federal de Itajubá.
- BONALDI, E. L., SILVA, L. E., TORRES, G. L., & OLIVEIRA, L. E. (2002). *A Rough sets based classifier for induction motors fault diagnosis*. Londres: WSEAS transactions on system.
- BRIAN, L. (1998). *An unsupervised neural network fault discriminating system implementation for on-line condition monitoring and diagnostics of induction machines*. Georgia: Tese de PhD em Engenharia Electrica Georgia Institute of Technology.
- CHAPMAN, S. J. (2013). *Fundamentos de Máquinas Elébricas*. . Porto Alegre: McGraw-Hill: 5. ed.
- DINIZ, S. V. (2008). *Detecção de curto-circuito entre espiras do enrolamento do estator utilizando análise termográfica*.
- FUPAI. (2002). *Análise de Vibrações I – Medidas e Diagnósticos*.
- FUPAI. (n.d.). *Análise de Vibrações I – Medidas e Diagnósticos*. 2002.
- GAZZANA, D. S. (2004). *Detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução utilizando o método da assinatura de corrente e lógica fuzzy*. Porto Alegre: Dissertação de mestrado. .
- GOMES, T. (2014). *DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO ATRAVÉS DE DIAGRAMAS FASORIAIS*.
- IEEE. (2014). *Detection and Classification of Induction Motor Faults Using Motor Current Signature* . Malasia: International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014).
- KASHIWAGI MASAMORI, D. C. (2014). *Proposta de desenvolvimento de um sistema de diagnóstico para detecção de barras rompidas, em motores de indução com rotor em gaiola, baseado em transformada de wavelet [Online]*. -.
- MAHELA, N. (2010). *Monitorização da condição e diagnóstico de falha do motor de indução utilizando a análise da assinatura da corrente do motor* . India: Instituto Nacional de Engenharia Elétrica de Kurukshetra.
- McRoberts, M. (2011). *Arduino basico*. Brasilia: Novatec.

- MENEGAT, J. (2014). *ESTUDO DE FALHAS INCIPIENTES*. Porto Alegre: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.
- NAU, S. L. (2007). *ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE DO ROTOR SOBRE O RUÍDO ACÚSTICO DE ORIGEM MAGNÉTICA GERADO POR MOTORES*. FLORIANÓPOLIS.
- PAULO, L. F. (2007). *Monitoramento permanente de motores de indução trifásicos*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Penrose, H. W. (n.d.). *Practical Motor Current Signature Practical Motor Current Signature*. ALL test pro.
- Pinheiro, H. (2011). *sistema de detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução trifásica usando lógica fuzzy*. Natal: dissertação de mestrado.
- REIS, A. J. (2010). *Reconhecimento de Padrões de Falhas em Motores Trifásicos Utilizando Redes Neurais*. Natal.
- RODRÍGUEZ, P. V., BELAHÇEN, A., ARKKIO, A., LAIHO, A., & DAVIU, A. (2008). *Air-gap force distribution and vibration pattern of induction motors under dynamic eccentricity*. Electrical Engineering.
- ROLAND, C. (2003). *Fault diagnosis of induction motors by pattern recognition*. Franca.
- SHINDO, R. (2003). *Cálculo de parâmetros de Motor de Indução Trifásico utilizando o método dos elementos finitos*. . Dissertação (Mestrado).
- Silva, G. H. (2018). *Desenvolvimento e Validação de um equipamento de baixo custo para medição de vibração*. Uberlândia.
- SKF, C. M. (2000). *Identificando estágios de falhas em rolamentos*.
- SKF, S. (2000). *Identificando estágios de falhas em rolamentos*. . Brasil.
- UMANS, S. D. (2014). *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. . Porto Alegre: McGraw-Hill: 7. ed. .
- WAGECK, M. (2015). *DETECÇÃO DE DEFEITOS EM MOTORES DE INDUÇÃO PELA ANÁLISE DA ASSINATURA DA CORRENTE ELÉTRICA*. Curitiba.
- WEG. (2016). *Motores Elétricos - Guia de Especificação*. [S.l.], . Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/>>.

## ANEXOS

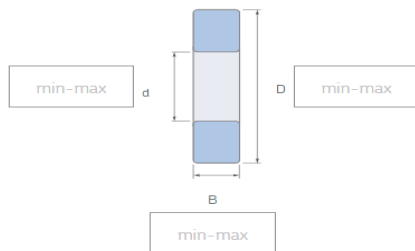
### Anexo 1 – Cálculo da frequência dos componentes do rolamento

#### Inserção da referência do rolamento

##### Filters

###### Dimensional constraints

Enter exact dimensions or ranges in mm to filter (e.g. 23-27, -40)



###### Bearing types

Select bearing type

###### SKF Explorer bearings ⓘ

Filter on SKF Explorer items only

###### Capping ⓘ

Filter on open/capped bearings

Q 6328

| Principal dimensions |        |        | Basic load ratings |         | Designation |
|----------------------|--------|--------|--------------------|---------|-------------|
| d (mm)               | D (mm) | B (mm) | C (kN)             | Co (kN) |             |
| 140                  | 300    | 62     | 251                | 245     | ☆ 6328      |
| 140                  | 300    | 62     | 251                | 245     | ☆ 6328 M    |

#### Inserção da velocidade do rotor do motor dado na chapa característica do motor



Speed

r/min

1490

+ Add load case



Calculate

Apos a inserção da velocidade do rotor, teremos as frequências de defeito do rolamento.

| Frequency of over-rolling |                     |                 |
|---------------------------|---------------------|-----------------|
| Point on inner ring       | Point on outer ring | Rolling element |
| $f_{ip}$ (Hz)             | $f_{ep}$ (Hz)       | $f_{rp}$ (Hz)   |
| 120.837                   | 77.83               | 109.34          |



## Anexo 2 - Carta de aceitação de estágio



08 de Agosto de 2022, Maputo

À UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE – FACULDADE DE ENGENHARIA  
Att: DEPARTAMENTO DE ELETROTECNIA

Assunto: Aceite o estudante como estagiário

A ICRO MOZAMBIQUE TECNOLOGIA & CAPACITAÇÃO TÉCNICA, LDA, registada para os efeitos fiscais o NUIT 400 364 788, com sede no Aterro da Maxaquene, Rua 1233 ,3º andar "A", Cidade de Maputo, por meio desta, declaramos a V. Excia que o estudante **Melosovik Tomas Filimone Magumisse**, do curso de Engenharia Elétrica, iniciou o estágio na nossa empresa na data de 08 de agosto de 2022 com o período de 90 dias como **Técnico de Campo** na área da Manutenção preditiva, onde as atividades de estágio irão decorrer nas instalações do **Corredor logístico de Nacala**.

Sem outro assunto de momento, subscrevemo-nos

Atenciosamente.

Supervisor da Empresa  
ICRO MOZAMBIQUE LDA  
NUIT 400364788

\_\_\_\_\_  
Icro Mozambique Tecnologia e Capacitação Técnica, Lda

Recebido  
31/08/2022  
UNIVERSIDADE  
EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
SECRETARIA GERAL

Aterro da Maxaquene, Rua 1233, Nº 83, 3º Andar – A, Bairro Central, Maputo, Moçambique

## Anexo 3 - Termo de atribuição de tema e plano de actividades



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Curso de Engenharia Eléctrica

### TERMO DE ATRIBUIÇÃO DE TEMA DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

REFERÊNCIA DO TEMA: 2022ELEPD29

DATA: 23/09/2022

#### 1. TÍTULO DO TEMA:

Análise comparativa dos métodos de análise de vibração e análise de assinatura de corrente de motor (MCSA) para deteção de falhas em motores eléctricos de indução trifásicos no Corredor Logístico de Nacala (CLN), planta de tratamento de Água.

#### 2. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO TRABALHO A REALIZAR

##### 2.1. Introdução

A manutenção é um conjunto de cuidados técnicos indispensáveis, de grande valia nas indústrias que prezam pela constante produtividade, confiabilidade e disponibilidade de seus equipamentos.

O setor industrial possui preocupação com a qualidade e eficiência de seu processo de produção, com o menor custo possível. Considera-se que nenhum equipamento continuará operando com desempenho satisfatório à medida que o tempo passa, portanto, as empresas entendem a necessidade de aplicação de uma estratégia de manutenção confiável e segura. Este trabalho mostra a relevância de aplicação de técnicas preditivas na manutenção e irá expor que quanto mais técnicas se utilizar para predição de falha em um equipamento tão relevante como o motor de indução trifásico é para a indústria, melhor será para uma intervenção assertiva quando necessário. Além disso, sem que haja paradas de processos inesperadas que geram transtornos para produção e custos da empresa.

1

Zenilda José Mando

## 2.2. Formulação do problema

O grau de importância na detecção de defeitos em motores elétricos está relacionado a diminuição dos custos de manutenção e consequentemente a maior disponibilidade dos equipamentos em produção. Com isso é aplicado um dos métodos de análise a qual é dada através das vibrações, pois o mesmo permite obter as componentes em frequência ao longo do tempo de funcionamento do equipamento, de forma a identificar a evolução de um possível problema.

Os motores na Planta de tratamento de água no CLN apresentam falhas que causam paradas emergenciais durante o processo logístico e tem impactados vários custos de manutenção, destacando as falhas: Desbalanceamento, desalinhamento, Folgas mecânicas, cavitação defeitos de rolamento devido a electro-erosão, Barras quebradas ou trincadas, Excentricidade do Air-gap, deterioração do isolamento, curto-circuito e empenamento do rotor.

Atualmente estes defeitos são detetados através da análise de vibração, porém o mesmo método não tem um certo grau aceitável de confiabilidade para detenção de falhas estáticas e rotóricas (Barras quebradas ou trincadas, Excentricidade do Air-gap, deterioração do isolamento, curto-circuito e empenamento do rotor), este presente relatório tem o propósito de fazer estudo de implementação do método MCSA a baixo custo para detenção de falhas estáticas e rotóricas no MIT, que servira de grande auxílio para análise de vibração. E surge a seguinte pergunta, **Entre a análise de vibração e análise de assinatura de corrente de motor qual dos métodos têm maior confiabilidade na detenção de falhas estáticas e rotóricas no MIT?**

## 2.3. Justificativa

Este trabalho visa apresentar uma forma de aplicação prática da manutenção preditiva que pode ser utilizada pelas indústrias que possuem motores elétricos compondo uma parcela considerável de seu parque de ativos em operação e precisam de um acompanhamento adequado e que não necessite realizar paradas em seu processo de produção para detenção de possíveis falhas. Baseado na necessidade existente em reduzir gastos com falhas em motores elétricos que ocasionam custos

elevados ao parque industrial.

Os Motores de Indução Trifásica (MIT), são indispensáveis para qualquer processo indispensáveis e estes tem o tempo de vida útil bastante elevado, mas devido a exposição que estão inseridos na planta de industrial cria possibilidade de haver falhas no meio do processo que causam custos elevados. O presente projecto visa fazer estudo de técnicas para continua monitoração por condição dos mesmos activos ( MIT) de modo a garantir extensão da vida útil e a não paradas emergencial por corretiva. Já existe no plano de manutenção do corredor logístico de Nacala ( CLN) a manutenção preditiva para monitoração continua, pela qual a técnica usual para detenção de falhas nos MIT é a análise de vibração, em contra partida verifica-se baixo rendimento dos MIT, e falhas inesperadas devidos a defeitos encontrados no motor, surge a possibilidade de haver incapacidade do método de análise de vibração para detenção de falhas rotóricas e estátoricas no MIT, assim surge a motivação de fazer estudo comparativo entre o método de análise de vibração e MCSA para apurar se realmente o MCSA tem a capacidade de detectar as falhas rotóricas e estátoricas com maior confiabilidade em relação a análise de vibração .

#### **2.4.Objectivos**

##### **Objetivo geral**

Analisar de forma comparativa os métodos de analise vibração e analise de assinatura da corrente do motor ( MCSA) para detenção de falhas em motores elétricos de indução trifásicos no Corredor Logístico de Nacala.

##### **Objetivos específicos**

- Identificar as Falhas comuns em MIT;
- Descrever as Falhas comuns em MIT;
- Identificar as falhas do MIT nos espectros de vibração e corrente;
- Discutir os métodos de analise vibração e analise de assinatura da corrente do motor;
- Apontar as desvantagens e vantagens dos métodos em causa.

#### **2.5. Metodologia**


Para a elaboração deste projecto ser aplicada três metodologias:

1. **Revisão Bibliográfica:** Será fundamental para a elaboração do projecto um estudo sobre o tema, que consistira em constantes leituras em manuais, revistas, artigos, estudos de caso, entre outros materiais relevantes para o estudo;
2. **Pesquisa de Campo:** Consistirá em visita na planta onde estão instalados os motores de indução trifásico, de modo a fazer o mapeamento do activo, local e o ambiente de coleta de modo a garantir a segurança do colectador em campo e posteriormente levantamento de dados para construções de hierarquias, rotas e dados de frequências de funcionamento e naturais dos activos em estudo;
3. **Análise de dados:** Após da coleta de dados em campo (**vibração e corrente instantânea**), farci análise dados em forma espectrais e nível global de tendência de modo a apurar o método com maior confiabilidade para detenção das falhas pertinentes a este estudo.

### 3. LOCAL DE REALIZAÇÃO DO ESTUDO

Nampula, Nacala – Velha – Porto CLN

### 4. SUPERVISORES

|                | Nome                 | Assinatura  |
|----------------|----------------------|---|
| Da UEM         | Engº Zefanias Mabote | Zefanias José Mabote  |
| Co-supervisor  |                      |   |
| Da instituição | Engº Pedro Ernesto   |  |

Maputo, 23 de Setembro de 2022

O estudante

Melosovik Magumisse

(Melosovik Magumisse)

O Director do Curso

Zefanias José Mabote

(Engº Zefanias Mabote)

10.10.2022

O Chefe da comissão científica  
Jose Nelson Guambe

(Mestre José Guambe, Engº)

### Plano de actividades

**TEMA:** Análise comparativa dos métodos de análise de vibração e análise de assinatura de corrente de motor (MCSA) para deteção de falhas em motores elétricos de indução trifásico no Corredor Logístico de Nacala (CLN), planta de tratamento de Água.

**Referência:** 2022ELEPD29

**Data:** 23/09/2022

| Semana                                  | Data Prevista | Data de encontro | Hora                                    | Assunto   |
|---|---------------|------------------|---|---|
| 1                                       | 19/09 – 23/09 | 23/09/2022       | 14:00                                   | Apresentação de TAT e PA  |
| 2                                       | 10/10 – 14/10 | 14/10/2022       | 14:00                                   | Recolha de dados bibliográficos.<br>Apresentação dos Capítulos I, II e III<br>(Introdução, Metodologia e Revisão Bibliográfica)   |
| 3                                       | 31/10 – 04/11 | 04/11/2022       | 14:00                                   | Coleta de dados em campo, compilação e tratamento. Apresentação dos capítulos IV e V (Memória descritiva e Resultados e discussões) e as correções dos Capítulos I e II |
| 4                                       | 21/11 – 25/11 | 25/11/2022       | 14:00                                   | Apresentar as correções dos capítulos IV e V  |
| 5                                       | 12/12 – 16/12 | 15 e 16/12/2022  | 14:00                                   | Apresentação e entrega do Relatório Final   |
| <b>Supervisor:</b> Engº Zefanias Mabote |               |                  | Assinatura: <i>Zefanias José Mabote</i> |   |
| <b>Estudante:</b> Melosovik Magumisse   |               |                  | Assinatura: <i>Melosovik Magumisse</i>  |   |

23/09/2022

Nome do estudante:

*Melosovik Magumisse*

(Melosovik Magumisse)

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA

**F2 – GUIA DE AVALIAÇÃO DA APRESENTAÇÃO ORAL E DEFESA**

Nome do estudante: Melosovik Tomas Filimone Magumisse

Referência do tema: 2022ELEPD29 Data: 14/dezembro/2022

Título do tema: Estudo comparativo do método de análise de vibração e análise de assinatura de corrente de motor (MCSA) para deteção de falhas em motores elétricos de indução trifásico no Corredor Logístico de Nacala (CLN)

| Indicador   | Classificação |   |   |   |   |
|---|---------------|---|---|---|---|
|   | 1             | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <b>Atitude geral</b> (manteve uma disposição positiva e sentido de humor)   |               |   |   |   |   |
| <b>Dedicação e comprometimento</b> (Deu grande prioridade ao projecto e aceitou as responsabilidades prontamente) |               |   |   |   |   |
| <b>Independência</b> (realizou as tarefas independentemente, como prometido e a tempo)                            |               |   |   |   |   |
| <b>Iniciativa</b> (viu o que devia ter sido feito e fê-lo sem hesitar e sem pressões do supervisor)               |               |   |   |   |   |
| <b>Flexibilidade</b> (disponibilidade para se adaptar e estabelecer compromissos)                                 |               |   |   |   |   |
| <b>Sensibilidade</b> (ouviu e tentou compreender as opiniões dos outros)  |               |   |   |   |   |
| <b>Criatividade</b> (contribuiu com imaginação e novas ideias)  |               |   |   |   |   |
| <b>Total de pontos (max: 35)</b>  |               |   |   |   |   |

| Valor do classificador | Cotação obtida | Significado                   |
|------------------------|----------------|-------------------------------|
|                        | 1              | Não aceitável (0 a 9 valores) |
|                        | 2              | Suficiente (10 a 13 valores)  |
|                        | 3              | Bom (14 a 16 valores)         |
|                        | 4              | Muito Bom (17 a 18 valores)   |
|                        | 5              | Excelente (19 a 20 valores)   |

**Total de pontos (max: 35)**

**Nota (=Total\*20/35)**