



**POLITECNICO
SETÚBAL**

Gil Canastra dos
Santos

**Deteção e diagnóstico de falhas em
motores de indução trifásicos: Uma
abordagem baseada na análise de
vibrações.**

Relatório de Dissertação do **Mestrado em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores –
Ramo Energias Renováveis e Sistemas de
Potência da Escola Superior de Tecnologia de
Setúbal**

Presidente: Doutor Filipe Duarte dos Santos
Cardoso, EST Setúbal/IPS

Orientador: Doutor Daniel José Medronho
Foito, EST Setúbal/IPS

Arguente: Doutor Pedro Miguel Ribeiro Pereira,
FCT/UNL

Setúbal, 2025

Um agradecimento especial à minha esposa pela compreensão e pelo apoio para a realização deste objetivo.

“Cinco, Punho Dedo”

Agradecimentos

A realização desta dissertação para a conclusão do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores foi um desafio com elevado grau de dificuldade e o mesmo não teria sido possível de ultrapassar sem o contributo de várias pessoas e instituições.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer em meu nome pessoal ao meu orientador, o Professor Doutor Daniel Foito pela disponibilidade, pela compreensão e pelo apoio ao longo deste trabalho.

Em segundo agradecer à empresa *The Navigator Company*, na pessoa do Engenheiro Pedro Almeida Soares, por sempre se mostrar disponível para o empréstimo de material para os ensaios laboratoriais a executar, assim como o uso das instalações para a realização deste relatório de dissertação.

Gostaria de agradecer também à Escola Superior de Tecnologia de Setúbal pelo uso do laboratório, assim como do material que nele se encontra para a realização dos ensaios necessários.

Um agradecimento especial ao meu colega e amigo João Martins pelo apoio, que aceitou o meu desafio em ingressar no Mestrado.

Por fim, uma palavra especial à minha esposa e à minha família por todo o apoio e motivação que me passou, mesmo nos momentos mais difíceis em que o cansaço profissional ameaçou ser superior à vontade de concluir esta etapa.

Resumo

No contexto dos motores de indução trifásicos são utilizadas algumas técnicas de diagnóstico, entre elas a análise de vibrações, termografia e análise do espectro de correntes. Cada uma destas técnicas fornece informações complementares sobre o estado de condição da máquina sem ser necessário provocar a sua paragem para realizar esta análise.

A análise de condição representa uma mudança de paradigma na gestão de ativos na indústria, substituindo as estratégias reativas e preventivas por uma estratégia proactiva com base em evidências. A monitorização em contínuo, ou de forma periódica, de grandezas específicas que refletem a condição dos equipamentos, permite traçar tendências de degradação e identificar anomalias antes que estas evoluam para falhas que podem ser catastróficas.

O presente trabalho investiga a aplicação de acelerómetros na análise de avarias de motores de indução trifásicos, propondo uma metodologia fidedigna para a deteção e classificação de diversas falhas que afetam estes equipamentos.

A pesquisa fundamenta-se no princípio de que qualquer anomalia no funcionamento do motor de indução produz padrões característicos de vibração mecânica que podem ser detetados, medidos e analisados através de acelerómetros. Estes convertem o movimento vibratório em sinais de grandeza elétrica mensuráveis, destacando-se pela sua natureza não invasiva, permitindo a monitorização contínua sem interferir no regular funcionamento.

O estudo, caracteriza as principais falhas em motores de indução, divididas em dois grupos, as falhas elétricas e as falhas mecânicas. Para cada categoria, foram identificados os padrões vibratórios característicos, estabelecendo correlações entre padrões específicos de vibração e os mecanismos físicos subjacentes às diferentes anomalias.

Palavras-chave: Motores de indução trifásica, falhas elétricas, falhas mecânicas, Padrões característicos de vibração

Abstract

In the context of three-phase induction motors, several diagnostic techniques are employed, including vibration analysis, thermography, and current spectrum analysis. Each of these techniques provides complementary information about the machine's condition without requiring it to be shut down for the analysis.

Condition analysis represents a paradigm shift in industrial asset management, replacing reactive and preventive strategies with an evidence-based, proactive strategy. Continuous or periodic monitoring of specific parameters that reflect the equipment's condition makes it possible to track degradation trends and identify anomalies before they evolve into potentially catastrophic failures.

The present work investigates the application of accelerometers in the analysis of faults in three-phase induction motors, proposing a reliable methodology for the detection and classification of various faults that affect this equipment.

The research is based on the principle that any anomaly in the operation of an induction motor produces characteristic mechanical vibration patterns that can be detected, measured, and analyzed using accelerometers. These devices convert the vibratory motion into measurable electrical signals, standing out for their non-invasive nature, which allows for continuous monitoring without interfering with regular operation.

The study characterizes the main faults in induction motors, dividing them into two groups: electrical faults and mechanical faults. For each category, characteristic vibration patterns were identified, establishing correlations between specific vibration patterns and the underlying physical mechanisms of the different anomalies.

Keywords: Three-phase induction motors, electrical faults, mechanical faults, Characteristic mechanical vibration patterns

Índice

Capítulo 1: Introdução	1
Prefácio	1
Motivação e Enquadramento	2
Objetivos	4
Objetivo Geral.....	4
Objetivos Específicos.....	4
Contribuições Esperadas	5
Estrutura e Organização do Trabalho	5
Capítulo 2: Estado de Arte	7
2.1. Motores de Indução Trifásicos	7
2.1.1. Componentes Principais	9
2.1.2. Conceito de Falha.....	12
2.1.3. Principais Falhas nos Motores de Indução Trifásicos.....	13
2.2. Panorama da Manutenção	22
2.2.1. Estratégias de Manutenção	23
2.2.2. Técnicas Avançadas de Manutenção.....	26
2.2.3. Impacto Económico e Operacional.....	27
2.3. Técnicas de Manutenção Aplicadas a Motores de Indução	29
2.4. Revisão de Literatura sobre Detecção de Falhas em Motores	33
2.4.1. Fundamentos do <i>Condition-Based Maintenance</i> e Tipologias de Falhas	37
2.4.2. Assinaturas de Falhas Elétricas em Sinais Mecânicos.....	41
2.5. Aplicações de Acelerómetros na Monitorização do Estado de Condição	43
2.5.1. Princípios de funcionamento de acelerómetros.....	43
2.5.2. Tipos de Acelerómetros	45
2.5.3. Acelerómetros Triaxiais.....	47
2.5.4. Posicionamento e Instalação	48
2.5.5. Sistema de Aquisição de Dados de Vibração.....	50
2.5.6. O Sinal de Vibração como Vetor Triaxial.....	52
2.6. Técnicas de Processamento e Transmissão de Sinais para Diagnóstico	54
2.6.1. Processamento de Sinais para Análise de Vibração	55
2.6.2. Transformada Rápida de Fourier (FFT)	61
2.6.3. Transformada de <i>Wavelet</i>	62
2.6.4. Vetor de <i>Park</i>	64
2.6.5. Técnicas avançadas de Processamento.....	66

2.6.6. Conversão de Sinais para Imagens 2D.....	67
2.7. Sistemas de Manutenção Preditiva Baseados em Vibração	68
2.7.1. Diagnóstico Híbrido e as suas Vantagens.....	69
Capítulo 3: Método de deteção proposto	72
3.1. Abordagem Proposta	72
3.2. Equipamentos e Materiais	74
3.2.1. Especificações dos Motores de Indução	74
3.2.2. Acelerómetros Triaxiais Utilizados	76
3.2.3. Sistema de Aquisição de Dados	77
3.2.4. Bancada de Testes	78
3.3. Procedimentos Experimentais	79
3.3.1. Indução Controlada de Falhas	79
3.3.2. Posicionamento dos Acelerómetros	85
3.3.3. Protocolo de Aquisição de Dados	86
3.3.4. Ensaios Efetuados	86
3.4. Processamento e Análise de Dados	88
3.4.1. Processamento dos Sinais.....	88
3.4.2. Algoritmos de Deteção e Diagnostico	89
Capítulo 4: Resultados e Discussão	90
4.1. Caracterização do Perfil de Vibração.....	90
4.1.1. Motor Sem Falha	91
4.1.2. Falhas no Rotor	96
4.1.3. Falhas no Estator.....	101
4.1.4. Excentricidade	106
4.2. Análise Crítica do Diagnóstico de Falhas: Eficácia e Limitações	108
Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros	110
5.1. Conclusões.....	110
5.2. Implicações Práticas e Trabalhos Futuros	111
Referências Bibliográficas	112
Apêndices	118
Apêndice I – Guia de Análise de Vibração, EMERSON.....	119
Apêndice II – Guia de Análise de Vibração, MOBIUS	120

Índice de Figuras

Figura 1 – Universo tecnológico de Motores Elétricos [7].....	7
Figura 2 – Ilustração do motor de indução trifásico [8].	11
Figura 3 - Percentagem dos principais componentes que sofrem falha nos motores de indução[10].	13
Figura 4 – Distribuição das causas de falhas em rolamentos em percentagem [12]	15
Figura 5 - Exemplo de motor queimado por alimentação desequilibrada [14]	16
Figura 6 - Exemplo de motor queimado por sobreaquecimento [14].....	16
Figura 7 - Exemplo de motor queimado por pico de tensão [14].....	17
Figura 8 - Exemplo de motor queimado por rotor travado [14].....	17
Figura 9 – Ilustração de estrutura tipo de um rotor de um motor de indução trifásico [15]	19
Figura 10 – Exemplo de excentricidade estática e espectro de frequência da corrente de alimentação [18].....	20
Figura 11 – Condições de excentricidade: a) excentricidade nula b) excentricidade estática e b) excentricidade dinâmica.....	21
Figura 12 – Exemplo de deformação do eixo e do rotor, respetivamente [20].....	22
Figura 13 – Percentagem de Tempo gasto em Manutenção [21].....	25
Figura 14 - Exemplo de termografia a um motor de indução trifásico, com aumento de temperatura na carcaça que pode gerar problemas futuros no enrolamento [36]	40
Figura 15 – Ilustração do funcionamento dos acelerómetros do tipo capacitivos [44], [45]	45
Figura 16 – Ilustração do funcionamento dos acelerómetros do tipo Piezoelétricos [44].	46
Figura 17 – Ilustração do funcionamento dos acelerómetros do tipo Piezoresistivos [44]	47
Figura 18 – Localização de acelerómetros num conjunto motor bomba [47]	49
Figura 19 – Valores de medida de vibração para um sinal complexo [55]	57
Figura 20 - Diagrama da abordagem proposta	73
Figura 21 – Fotografia de um dos ensaios de excentricidade no motor B	76
Figura 22 - Fotografia da bancada de ensaios, montada para a realização dos mesmos, de forma controlada.....	78
Figura 23 - Modificação física efetuado rotor por forma a obter a avaria designada por barras partidas	80
Figura 24 – Representação do passo polar 8-10-12.....	81
Figura 25 – Ilustração da bobinagem do motor de indução preparado para simulação da falha.....	81
Figura 26 -. Esquema representativo da bobina modificada do passo polar 1 a 12, inserida na Fase U[74]	82
Figura 27 - Esquema representativo da bobina modificada do passo polar 1 a 12, inserida na Fase V[74]	82
Figura 28 - Placa de Ligações interativa presente no Motor de Indução modificado para realizar o ensaio do curto-circuito (Motor A).....	83
Figura 29 – Fotografia do curto-circuito nos enrolamentos do moto A.....	83

Figura 30 - Acessório utilizado para simulação da falha de excentricidade	84
Figura 31 – Fotografia do ensaio onde foi utilizado o motor B	85
Figura 32 - Posicionamento escolhido para aplicação do acelerómetro em, a) Motor A e b) Motor B	86
Figura 33 – Tratamento do sinal vibratório no AMS 2140 para o Machinery Manager	89
Figura 34 – Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor A em vazio	91
Figura 35 – Espectro de vibrações no eixo vertical do motor A em vazio	91
Figura 36 - Espectro de vibrações no eixo axial do motor A em vazio	92
Figura 37 – Gráfico de dispersão de pontos de vibração do motor em mV A em vazio segundo os eixos cartesianos X, Y e Z.	93
Figura 38 – Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos Z e X e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos Y e X.	93
Figura 39 – Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor A em carga	94
Figura 40 – Espectro de vibrações no eixo vertical do motor A em carga.....	94
Figura 41 - Espectro de vibrações no eixo vertical do motor A em carga	94
Figura 42 - Gráfico de dispersão de pontos de vibração do motor em mV A em carga segundo os eixos cartesianos X, Y e Z.	95
Figura 43 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Z e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y.	96
Figura 44 - Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor A em carga e com a falha de rotor simulado	96
Figura 45 - Espectro de vibrações no eixo vertical do motor A em carga e com a falha de rotor simulado	97
Figura 46 - Espectro de vibrações no eixo axial do motor A em carga e com a falha de rotor simulado.	97
Figura 47 – Gráfico de dispersão de pontos de vibração em mV do motor A com a falha de rotor, em carga e acoplado segundo as coordenadas cartesianas X, Y e Z.....	98
Figura 48 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos Z e Y.	98
Figura 49 – Espectro de vibrações do segundo ensaio no eixo horizontal do motor A em carga e com a falha de rotor simulado.....	99
Figura 50 – Espectro de vibrações do segundo ensaio no eixo vertical do motor A em carga e com a falha de rotor simulado.....	99
Figura 51 – Espectro de vibrações do segundo ensaio no eixo axial do motor A em carga e com a falha de rotor simulado.....	99
Figura 52 – Gráfico de dispersão de pontos de vibração em mV do motor A com a falha de rotor, em carga e acoplado segundo as coordenadas cartesianas X, Y e Z.....	100

Figura 53 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos Z e X.	100
Figura 54 - Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor A em carga e com a falha de curto-circuito entre espiras, oito espiras no total.....	101
Figura 55 - Espectro de vibrações no eixo vertical do motor A em carga e com a falha de curto-circuito entre espiras, oito espiras no total	101
Figura 56 - Espectro de vibrações no eixo axial do motor A em carga e com a falha de curto-circuito entre espiras, oito espiras no total.	102
Figura 57 - Gráfico de dispersão de pontos de vibração em mV do motor A com a falha curto-circuito entre espiras, oito no total, em carga e acoplado segundo as coordenadas cartesianas X, Y e Z.....	103
Figura 58 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos Z e X.	103
Figura 59 - Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor B em vazio, com a adição de uma resistência de 14 Ω numa das fases	104
Figura 60 - Espectro de vibrações no eixo vertical do motor B em vazio, com a adição de uma resistência de 14 Ω numa das fases	104
Figura 61 - Espectro de vibrações no eixo axial do motor B em vazio, com a adição de uma resistência de 14 Ω numa das fases	105
Figura 62 - Gráfico de dispersão de pontos de vibração do motor B em vazio com a adição de uma resistência de 14 Ω colocada numa das fases, segundo as coordenadas cartesianas X, Y e Z	105
Figura 63 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos Z e Y e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y.	106
Figura 64 - Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor B em vazio e com a falha de excentricidade com colocação de uma massa de 45g	106
Figura 65 - Espectro de vibrações no eixo vertical do motor B em vazio e com a falha de excentricidade com colocação de uma massa de 45g.....	107
Figura 66 - Espectro de vibrações no eixo axial do motor B em vazio e com a falha de excentricidade com colocação de uma massa de 45g.....	107
Figura 67 - Gráfico de dispersão de pontos de vibração em mV do motor B com a falha de excentricidade, em vazio segundo os eixos cartesianos X, Y e Z.	108
Figura 68 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos Y e Z.	108

Índice de tabelas

Tabela 1 – Tipos de falhas que se podem encontrar os processos industriais	12
Tabela 2 - Tipos de avarias mais frequentes nos motores de indução [11]	14
Tabela 3 - Tabela comparativa entre as técnicas de diagnóstico offline e online.	29
Tabela 4 - Tabela comparativa entre as combinações das técnicas de diagnóstico.....	32
Tabela 5 - Comparação entre técnicas de deteção de falhas em motores de indução	40
Tabela 6 - Especificações técnicas dos motores de indução utilizados	75
Tabela 7 -- Especificações técnicas do acelerómetro triaxial aplicado.....	76
Tabela 8 - Especificações do sistema de aquisição de dados	77
Tabela 9 - Características da bobinagem	81

Lista de siglas

2D – Duas Dimensões
3D – Três Dimensões
AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
BRB -*Broken Rotor Bars*
CBM – *Condition Based Maintenance*
C.C – Curto-Circuito
CNN – Convolutional Neural Network
CPT - Clarke-Park Transformation
CWT – Transformada de *Wavelet* Contínua
DFT – Transformada de *Fourier* Discreta
DL – *Deep Learning*
DVG – Gráfico de Visibilidade Diferencial
DWT - Transformada de *Wavelet* Discreta
EMD – Método Modo Empírico
FFT – Transformada Rápida de Fourier
IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
ITSC – *Inter-Turn Short Circuit*
MCA – *Motor Current Analysis*
MCC – *Motor Center Control*
MCSA – *Motor Current System Analysis*
MEMS – *Micro Electro-Mechanical System*
MIT – Motor de Indução Trifásico
ORS -*On Rotor Sensing*
PCA- Principais Componentes para Análise
PVA - *Park's Vector Approach*
RMS – Root Mean Square
SVA - Space Vector Analysis
SVM – Support Vector Machine
STFT – Transformada Fourier Curto Termo

UMP - Unbalanced Magnetic Pull

RNN – Redes Neurais Recorrentes

KNN – *k-Nearest Neighbors*

IMF – Funções de Modo Intrínseco

RGB – *Red, Green and Blue*

MLP – *Multilayer perceptron*

Lista de símbolos

- A_x – Amplitude do sinal de vibração no eixo dos xx
 A_y – Amplitude do sinal de vibração no eixo dos yy
 A_z – Amplitude do sinal de vibração no eixo dos zz
 f_{BRB} – Frequência de Barras partidas no Rotor
 f_R – Frequência de Rotação
 f_{rbpf} – Frequência Polos das Barras do Rotor
 f_S – Frequência de Alimentação
 f_{pp} – Frequência de Passagem de Polos
 g – Unidade de aceleração $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$
 k – Ordem Harmónica
 N_p – nº de polos
 N_s – Velocidade Síncrona
 N_r - Velocidade Rotor
 O_E – Centro geométrico do perímetro interno do estator
 O_R – Centro de rotação
 O_r - Centro geométrico do rotor
 p – nº de pares de pólos do motor
 s - Escorregamento do motor
 ω – Velocidade

Capítulo 1: Introdução

Prefácio

Atualmente o motor de indução trifásica (MIT) é o mais utilizado na indústria, quase na totalidade do parque de máquinas elétricas, e consome cerca de metade da eletricidade gerada no mundo. A sua robustez e simplicidade de construção faz com que seja amplamente aplicado como acionamento eletromecânico, de forma a garantir a continuidade do processo produtivo sem interrupções. Quando um equipamento essencial interrompe o funcionamento sem ser de forma planeada, este desencadeia uma sequência de consequências que ultrapassam o momento da falha [1].

O elevado grau de desempenho que existe nos dias de hoje implica uma crescente necessidade do uso da manutenção preditiva, para que seja possível planejar e preparar as paragens ou intervenções, sejam estas para reparação ou para substituição de equipamentos [1].

Para um aumento da eficácia da manutenção é necessária uma monitorização da condição dos equipamentos e dos processos produtivos, por forma a conseguir identificar o estado das máquinas elétricas e assim garantir que estas não falham durante a operação. Por forma a minimizar os custos de manutenção e paragens intempestivas, as condições dos motores são continuamente monitorizadas na tentativa de identificar sinais precoces de falha [2]. A fiabilidade dos dados adquiridos é importantíssima para que a análise de condição dos equipamentos seja a mais próxima da realidade possível.

Presentemente, na indústria são aplicadas três estratégias de manutenção, sendo a menos complexa a corretiva. Esta consiste na atuação após ocorrência da falha. Pode implicar a paragem intempestiva, tendo maiores prejuízos para a produção e instalação. A segunda estratégia é a manutenção preventiva. Esta tem por base um regime periódico onde não é necessário que se assista a uma degradação do estado da condição da máquina. Por último a manutenção preditiva, esta a mais complexa

das três estratégias, mas também a mais eficaz em termos financeiros e produtivos. Consiste na monitorização e análise de determinadas características por forma a detetar a mudança de comportamento por parte de determinado equipamento prevendo o acontecimento da eventual falha.

Na indústria são utilizadas duas técnicas para a obtenção de dados para análise de condição da máquina, o espectro de corrente elétrica (*MCSA*) e o espectro de vibração. As duas técnicas são não invasivas e permitem que o motor continue a trabalhar normalmente enquanto se consegue observar a sua condição [3].

Com este trabalho pretende-se fazer uma análise do espectro de vibração aplicada a motores de indução trifásicos. Estes como são os mais utilizados na indústria carecem de uma maior atenção durante o seu funcionamento. As falhas apresentadas, durante a utilização diária, estão repartidas pelos principais componentes de análise para deteção de falhas: os rolamentos, o estator e o rotor.

A metodologia conhecida de diagnóstico da análise de vibração de falhas no estator, rotor e da excentricidade, é aplicada em ambiente controlado. Para adquirir estes sinais com a precisão necessária, os acelerómetros triaxiais apresentam-se como sensores ideais, capazes de converter as vibrações mecânicas em sinais elétricos proporcionais que podem ser posteriormente processados e analisados. A capacidade de medição simultânea nos três eixos ortogonais (X, Y e Z) fornece uma visão tridimensional do comportamento vibratório do motor, possibilitando a identificação de padrões complexos que poderiam passar despercebidos em análises unidimensionais [4].

Motivação e Enquadramento

A realidade industrial nos dias de hoje caracteriza-se por um ambiente extremamente competitivo, onde a eficiência produtiva assume um papel determinante na sustentabilidade económica das organizações. Neste cenário, a continuidade operacional emerge como um fator crítico de sucesso, sendo imperativo

que interrupções nos processos produtivos ocorram exclusivamente de forma planeada e controlada.

Para viabilizar o planeamento estratégico de investimentos e necessidades operacionais, torna-se fundamental desenvolver capacidades avançadas de deteção precoce de potenciais falhas, permitindo antecipar com precisão quais os componentes que poderão apresentar anomalias em determinados períodos. Esta antecipação possibilita não apenas a otimização dos recursos de manutenção, mas também a sincronização de intervenções com períodos de menor impacto produtivo, maximizando a disponibilidade efetiva dos equipamentos.

A distribuição estatística das falhas em motores de indução diz-nos que as falhas apresentadas pelos motores de indução são aproximadamente 41% estão relacionadas com anomalias nos rolamentos, enquanto as falhas no estator representam cerca de 30% e as falhas no rotor aproximadamente 10% [3],[5]. Esta distribuição evidencia a importância de desenvolver técnicas capazes de detetar e classificar com precisão estes três tipos fundamentais de anomalias.

Das diversas técnicas disponíveis para monitorização da condição dos motores, os acelerómetros destacam-se como ferramentas particularmente valiosas, oferecendo capacidades únicas para identificação de uma ampla gama de falhas em estágios iniciais de desenvolvimento. Os acelerómetros triaxiais permitem "reduzir as saídas sem comprometer a capacidade de deteção de falhas", otimizando a relação entre quantidade de dados e eficácia de diagnóstico. Esta característica é particularmente valiosa em ambientes industriais onde a gestão eficiente de dados representa um desafio crescente [4],[6].

Adicionalmente, a evolução tecnológica dos acelerómetros, com redução de tamanho, aumento de sensibilidade e incorporação de capacidades de comunicação *wireless*, viabiliza a sua perfeita integração com sistemas avançados de manutenção preditiva baseados em análise de dados em tempo real. Esta integração alinha-se

perfeitamente aos conceitos da Indústria 4.0, possibilitando a implementação de arquiteturas de monitorização distribuída com capacidades de diagnóstico automatizado e prognóstico de vida útil remanescente.

Objetivos

Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver e validar uma metodologia robusta para deteção e classificação de falhas em motores de indução trifásicos, tendo sempre presente a necessidade da melhoria da fiabilidade dos mesmos. Este trabalho baseia-se na utilização de acelerómetros triaxiais, com foco específico na identificação de anomalias no rotor, no estator e na excentricidade através da análise de padrões vibratórios característicos. Devido à não necessidade de invasão e paragem do motor de indução para intervenção, a utilização dos acelerómetros triaxiais revela-se como uma das principais tecnologias para obtenção de dados.

Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, o presente trabalho propõe-se a atingir objetivos específicos tanto do ponto de vista tecnológico como do ponto de vista científico. De seguida, apresentam-se esses mesmos objetivos enumerados:

Do ponto de vista tecnológico:

1. Caracterizar os padrões vibratórios específicos associados tanto ao correto funcionamento da máquina como à presença de falhas no rotor, estator e excentricidade, estabelecendo assinaturas de referência para cada tipo de anomalia estudada;
2. Avaliar a robustez da metodologia proposta em diferentes condições operacionais, incluindo variações de carga;

3. Estabelecer um procedimento para implementação na indústria da metodologia desenvolvida, considerando aspetos de custo-benefício, facilidade de instalação e integração em sistemas existentes.

Contribuições Esperadas

Esta dissertação pretende oferecer as seguintes contribuições no campo da deteção de falhas em motores de indução:

- Estabelecimento de uma biblioteca de assinaturas vibratórias características para diferentes tipos de falhas em motores de indução trifásicos, servindo como referência para futuros trabalhos na área;
- Validação experimental da eficácia da análise de vibração triaxial para deteção de falhas elétricas (tradicionalmente monitorizadas por outras técnicas), ampliando o espectro de aplicabilidade desta abordagem;

Estrutura e Organização do Trabalho

O trabalho apresentado encontra-se dividido em cinco capítulos, incluindo este. A organização apresentada tem como função uma apresentação lógica do trabalho desenvolvido, por forma a facilitar a interpretação e compreensão do mesmo.

Utilizar-se-ão figuras ilustrativas sobre os vários assuntos abordados sempre que se achar oportuno.

Neste primeiro capítulo é apresentado uma contextualização do tema, a motivação para o desenvolvimento do trabalho, os objetivos pressupostos, as contribuições a obter e, por fim, a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão do estado da arte necessária para a compreensão do trabalho, abordando a constituição dos motores de indução trifásicos, os diferentes tipos de falhas que os afetam e as técnicas disponíveis para

a sua deteção, tendo especial atenção nas aplicações de acelerómetros, as suas tipologias e os seus princípios de funcionamento para monitorização do estado de condição. Este capítulo também introduz uma visão geral sobre o tema de manutenção aplicada aos motores de indução trifásicos e apresenta as principais estratégias, técnicas e metodologias aplicadas na sua manutenção. Por fim neste capítulo também irão ser abordadas as diferentes técnicas de processamento de sinais para diagnóstico e os diferentes sistemas de diagnóstico utilizados na manutenção preditiva.

O Capítulo 3 detalha a metodologia proposta, assim como uma visão geral sobre a abordagem proposta, as especificações dos equipamentos utilizados, os procedimentos experimentais adotados e as técnicas de processamento e análise de dados implementadas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e a sua discussão, incluindo a caracterização das assinaturas vibratórias tanto no padrão de funcionamento correto do motor, como na presença dos diferentes tipos de falhas, a análise comparativa entre os diferentes eixos de medição, a avaliação da eficácia da metodologia aplicada, a análise de robustez a variações operacionais e a comparação relativamente a técnicas alternativas.

O Capítulo 5 sintetiza as conclusões do trabalho, destaca as contribuições práticas alcançadas, discute as limitações do estudo e as suas aplicações na indústria e apresenta recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2: Estado de Arte

2.1. Motores de Indução Trifásicos

Enquanto nos motores de corrente contínua o estator e o rotor necessitam de alimentação, nos motores de indução só o estator é alimentado. O rotor recebe energia por indução, por isso, estes motores são chamados de motores de indução. Trata-se de uma máquina robusta, de fácil construção e, por conseguinte, mais barata comparativamente a outras. A Figura 1 mostra o universo existente de motores, onde a azul se encontra assinalado o motor alvo do trabalho.

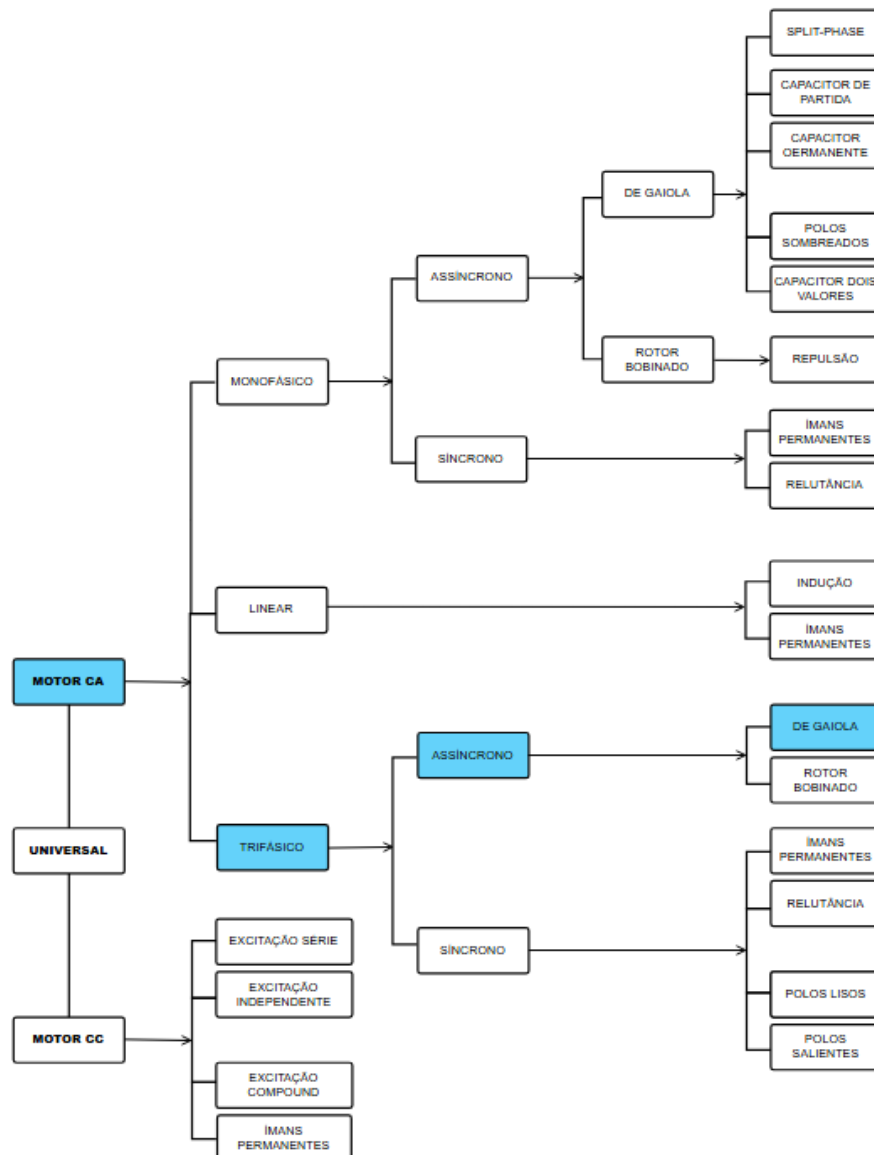


Figura 1 – Universo tecnológico de Motores Elétricos [7].

Um motor de indução tem nos enrolamentos do estator e do rotor apenas corrente alternada. Pode ser comparado com um transformador em que os enrolamentos do secundário recebem energia por indução. Os tipos básicos de motores de indução são os trifásicos e os monofásicos. Os motores de indução monofásicos, normalmente de potências baixas, têm uma grande aplicação, principalmente, na utilização doméstica. Por outro lado, os motores de indução trifásicos são utilizados na maioria dos acionamentos da indústria.

As máquinas rotativas de corrente alternada dividem-se em dois grandes grupos: máquinas síncronas e máquinas assíncronas. Uma máquina diz-se síncrona quando roda à velocidade do sincronismo. A velocidade de sincronismo n_s é a velocidade do campo magnético girante que é imposto pela frequência da tensão de alimentação, designada de f_s e pelo número de polos da máquina p . Esta é a velocidade máxima teórica que o rotor pode atingir e resulta da seguinte expressão:

$$n_s = \frac{120 * f_s}{p} \quad (1)$$

Uma máquina diz-se síncrona quando o seu rotor roda exatamente à velocidade do sincronismo, ou seja:

$$n_{rotor} = n_s$$

Nestas máquinas, não há escorregamento, pois o rotor é geralmente excitado por uma fonte de corrente contínua externa para que os polos magnéticos do rotor se "atraiam" perfeitamente com o campo magnético girante do estator.

Uma máquina é designada como assíncrona quando o seu rotor roda a uma velocidade diferente da velocidade de sincronismo:

$$n_{rotor} < n_s$$

A diferença entre a velocidade de sincronismo e a velocidade do rotor é conhecida como escorregamento. Este escorregamento é essencial para que o motor funcione, pois é a diferença de velocidade que induz a corrente no rotor de gaiola de esquilo, gerando o torque necessário para a rotação.

2.1.1. Componentes Principais

O motor de indução trifásico é composto por diversos elementos que podem ser divididos em três grandes grupos: a parte estacionária, onde se inclui o estator; a parte giratória, onde se inclui o rotor, cada um com funções específicas e suscetibilidades particulares a diferentes tipos de falhas e outros componentes essenciais. Partindo desta divisão, a parte estática é constituída pelos seguintes componentes:

1. Estator (Parte estática)

- **Carcaça:** É a estrutura externa do motor, geralmente feita de ferro fundido ou alumínio. A sua principal função é abrigar e proteger os componentes internos do motor, além de fornecer um meio para a montagem e fixação do motor. A carcaça também possui alhetas para a dissipação de calor, auxiliando no arrefecimento.
- **Núcleo do Estator:** É construído a partir de finas lâminas de aço silício (chapas laminadas) isoladas entre si. Essas lâminas são empilhadas e prensadas para formar um cilindro oco. A laminação é crucial para reduzir as perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault) e histerese, que ocorreriam se o núcleo fosse feito de material sólido. O núcleo possui ranhuras internas onde as bobinas do estator são inseridas.
- **Enrolamento do Estator:** Consiste em bobinas de fio condutor de cobre isolado, inseridas nas ranhuras do núcleo do estator. Essas bobinas são dispostas de forma a criar um conjunto de polos magnéticos. Num motor trifásico, existem três conjuntos de enrolamentos, um para cada fase da alimentação elétrica. Quando uma corrente alternada trifásica é aplicada a esses enrolamentos gera-se um campo magnético girante no entreferro (espaço entre o estator e o rotor).
- **Caixa de Ligação:** Localizada na carcaça é onde os terminais dos enrolamentos do estator são conectados à fonte de alimentação trifásica. Permite a configuração das ligações (estrela ou triângulo) de acordo com a tensão da rede.

2. Rotor

Existem dois tipos de rotor, são eles o de gaiola de esquilo (o que está presente no motor de indução trifásico) e o bobinado, em baixo são apresentados os constituintes de cada um deles.

- **Rotor Gaiola de Esquilo:**

- **Núcleo do Rotor:** Também é construído a partir de lâminas de aço laminadas e empilhadas, com ranhuras externas.
- **Barras Condutoras:** Barras de alumínio ou cobre são inseridas nas ranhuras do núcleo do rotor. Essas barras são curto-circuitadas em ambas as extremidades por anéis condutores (anéis de curto-circuito), formando uma estrutura que se assemelha a uma gaiola de esquilo.

- **Rotor Bobinado:**

- **Núcleo do Rotor:** Similar ao do rotor gaiola, mas com ranhuras para enrolamentos.
- **Enrolamento do Rotor:** Possui enrolamentos de fio de cobre, semelhantes aos do estator, mas conectados a anéis deslizantes (*slip rings*) montados no eixo do rotor.
- **Anéis Deslizantes e Escovas:** Escovas de carbono fazem contato com os anéis deslizantes, permitindo a conexão de resistores externos ao circuito do rotor. A variação da resistência externa permite controlar a corrente induzida no rotor e, conseqüentemente, o torque de partida e a velocidade do motor.

3. Outros Componentes Essenciais

- **Eixo:** É a parte central do rotor, geralmente feita de aço, que se estende para fora da carcaça do motor. É por meio do eixo que a potência mecânica gerada pelo motor é transmitida para o acionamento mecânico.
- **Rolamentos:** São componentes mecânicos que suportam o eixo do rotor, permitindo que ele gire suavemente com o mínimo de atrito. Podem ser rolamentos de esferas ou de roletes, e são cruciais para a eficiência e a vida útil do motor.
- **Ventilador:** Geralmente montado no eixo do rotor, na parte externa da carcaça, o ventilador é responsável por forçar a ventilação sobre as alhetas da carcaça, auxiliando na dissipação do calor gerado durante a operação do motor e mantendo a temperatura dentro dos limites aceitáveis.

Na Figura 2 encontra-se a ilustração de um motor de indução trifásico.



Figura 2 – Ilustração do motor de indução trifásico [8].

2.1.2. Conceito de Falha

O conceito de falha, na área de manutenção, é amplamente utilizado e representa as falhas que representam uma ameaça para a fiabilidade do processo e que requerem uma intervenção de manutenção. Os principais tipos de falhas presentes nos processos industriais encontram-se descritos na Tabela 1:

Tabela 1 – Tipos de falhas que se podem encontrar nos processos industriais

Categoria da Causa	Descrição e Exemplos
Falhas nos componentes do sistema	Falhas intrínsecas ao <i>hardware</i> . Causadas por desgaste natural, fadiga, corrosão ou quebra.
Falhas na alimentação	Interrupções ou problemas na qualidade das utilidades essenciais, como quedas de energia, baixa pressão de ar comprimido ou falta de água.
Distúrbios ambientais	Condições externas extremas que afetam o ativo.
Erros de operação humana	O operador utiliza o equipamento fora dos limites ou ignora procedimentos de segurança e alarmes.
Erros de manutenção	Falhas induzidas pela própria manutenção. Ocorrem devido a montagem incorreta, uso de peças inadequadas, contaminação.
Falha dos sistemas de controlo	Falha nos elementos de automação. Inclui o mau funcionamento do <i>hardware</i> de receção dos sinais e <i>software</i> de controlo.

Formalmente, as ameaças à fiabilidade dos equipamentos são dadas pelas faltas, falhas e erros. A definição de cada um destes termos é a seguinte:

- **Falta:** é também identificada como operação incorreta, caracterizada por um desvio anormal de pelo menos uma das propriedades ou parâmetros característicos de um dado sistema, uma vez definido o seu comportamento normal de funcionamento.
- **Erro:** é a discrepância entre um valor assumido e o seu valor medido, estimado ou previsto. Com a presença das faltas, surgem erros (ou desvios) mensuráveis que são utilizados na deteção das faltas. Os erros podem ser aditivos ou multiplicativos.
- **Falha, falha ou avaria:** é a perda permanente da habilidade de um sistema de operar de forma correta, devido à presença de uma falta. A falta é caracterizada como uma mudança que não é diretamente percebida, enquanto o erro é a medição em consequência dessa falta. Na prática, o termo falha é o mais utilizado na manutenção e pode ter vários significados. De uma forma geral, este termo implica que uma peça, equipamento ou processo ficou

completamente inoperante, embora esteja a funcionar, mas com limitações que impedem a execução de todas as funções para as quais foi designado ou está totalmente funcional, mas não é confiável na execução das tarefas sendo insegura a sua utilização.

2.1.3. Principais Falhas nos Motores de Indução Trifásicos

Com o aparecimento de sistemas de controlo de velocidade e torque, aplicados a motores de indução trifásicos, é comum a utilização destes em processos críticos ou de grande importância para a indústria. No passado, este tipo de aplicações era dominado de motor de corrente contínua. Os principais componentes do motor, presentes no total de falhas registadas na indústria, estão divididos como ilustra a Figura 3 [9].

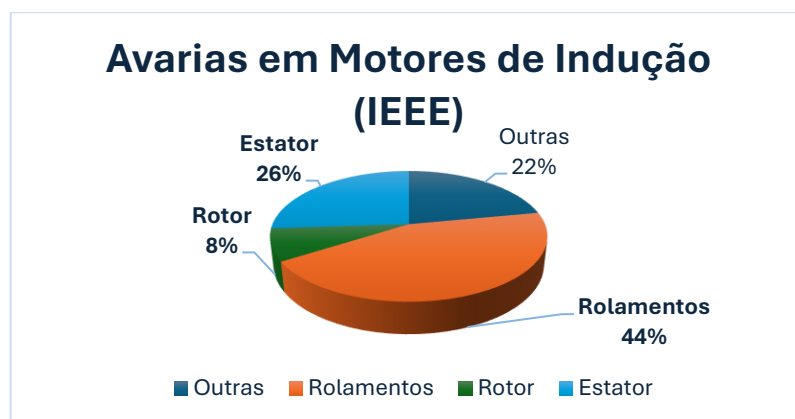


Figura 3 - Percentagem dos principais componentes que sofrem falha nos motores de indução[10].

Ao observar o gráfico anterior é possível verificar quais as partes mais suscetíveis a falhas e que, nesse sentido, merecem maior atenção por parte da equipa de manutenção. De notar que as falhas relativas aos rolamentos e aos enrolamentos do estator representam, juntos, 66% do total registado, enquanto as relativas ao rotor representam aproximadamente 8% desse valor. O restante abrange um conjunto diversificado de acontecimentos.

A Tabela 2 mostra as diferentes causas de avaria nos motores de indução.

Tabela 2 - Tipos de avarias mais frequentes nos motores de indução [11]

Avarias Elétricas	Curto-circuitos entre fases ou entre espiras de enrolamentos – falhas de isolamento elétrico.	Curto-circuitos entre fases ou entre espiras de enrolamentos – falhas de isolamento elétrico.	Ligações erradas entre enrolamentos.	Resistência elevada no contacto entre condutores de bobinas da mesma fase.	Circulação de correntes nos rolamentos e no veio - motores alimentados através de variadores de velocidade.	Problemas na ligação à terra.
Avarias Mecânicas	Barras do rotor partidas e/ou anéis partidos das extremidades das gaiolas do rotor.	Danificação do circuito magnético do motor (deterioração das propriedades magnéticas devido a temperaturas elevadas, ambientes agressivos, etc.)	Entrefeirros não uniformes.	Falhas nos rolamentos.	Deslocamento axial e radial do veio (excentricidades) e desalinhamentos.	Deformação do veio.
Avarias com Origem exterior	Sobretensões, subtensões e desequilíbrios nas tensões de alimentação do motor.	Arranques intempestivos ou cortes na alimentação.	Sobrecargas e/ou perda de uma ou mais fases.	Má seleção do motor.	Falhas nos componentes mecânicos de transmissão de potência.	Avaria no variador de velocidade.

2.1.4.1. Rolamentos

Podem ser diversas as causas das falhas nos rolamentos. Além do processo normal do aparecimento de falhas, pelo desgaste e envelhecimento do rolamento que faz com que apareçam fissuras abaixo da superfície das pistas e elementos rolantes, existem também outras condições que contribuem para a redução do tempo de vida útil do rolamento.

As principais causas externas para essa redução são as seguintes:

- **Contaminação:** o processo de contaminação acontece através de pequenas partículas de natureza abrasiva e dureza variável que frequentemente contaminam a lubrificação do rolamento, causando *pitting* e *sanding*;
- **Corrosão:** o processo de corrosão é iniciado pela presença de água, ácido, lubrificação deteriorada, entre outras. Com o avanço do processo de corrosão, as partículas são expelidas dando origem à mesma ação abrasiva da contaminação;
- **Lubrificação imprópria:** lubrificar em excesso ou em falta faz com que os elementos rolantes não rodem corretamente no filme de óleo, causando aquecimento. Esse aquecimento deteriora a graxa, diminuindo a lubrificação e acelerando o processo de falha;
- **Problemas na Instalação:** as falhas originadas por instalação imprópria são causadas por forçar o rolamento contra o eixo ou contra a carcaça, que dão origem a danos físicos no rolamento. Outros problemas comuns gerados por instalações incorretas são: desalinhamento, deflexão do eixo, empeno da pista interna e empeno da pista externa.

A passagem de corrente elétrica através da chumaceira, devido ao aparecimento de tensões induzidas no eixo, também são uma causa de falha nos rolamentos. Estas tensões aparecem devido à utilização de variadores de frequência e quando excedem a tensão de isolamento da película do lubrificante dos rolamentos, resultam num arco elétrico. Como consequência, tem-se a degradação do lubrificante, formação de cavidades ou estrias na superfície dos rolamentos e produção de partículas metálicas.

Na Figura 4 é possível verificar a distribuição das causas de falhas nos rolamentos, em percentagem.

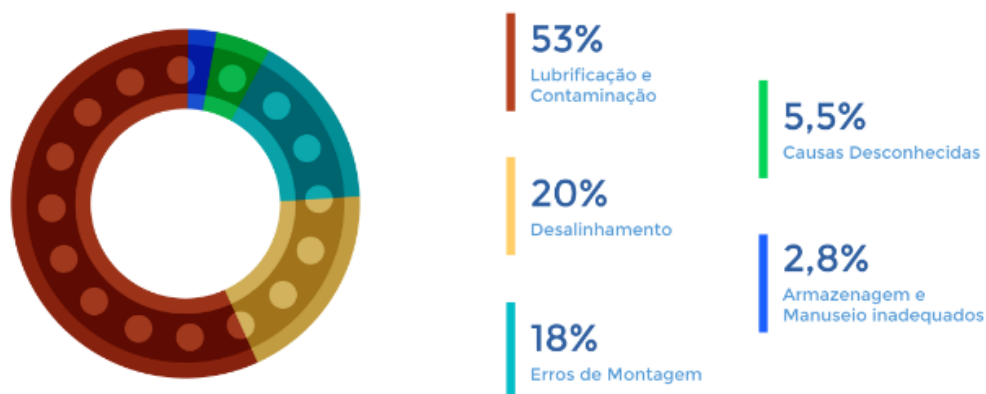


Figura 4 – Distribuição das causas de falhas em rolamentos em percentagem [12]

2.1.4.2. Estator

As avarias no estator representam 26% [10] do total de avarias em motores de indução, sendo que a maior parte encontra-se associada aos enrolamentos. Falhas no núcleo ferromagnético acontecem com menos frequência.

Os enrolamentos do estator estão sujeitos à ação de fadiga de natureza térmica, elétrica, mecânica e ambiental [13]. Nestas ações de fadiga, as dimensões e características nominais do motor, além das condições de operação, determinam a rapidez de evolução da degradação do isolamento e consequentemente o

aparecimento de avarias nos enrolamentos. Tais avarias apresentam se de diversas formas [10]:

- **Alimentação Desequilibrada:** induz altas temperaturas no interior dos motores, diminuindo a vida útil do isolamento provocando danos nos enrolamentos - a Figura 5 representa um exemplo de um motor queimado, por alimentação desequilibrada;

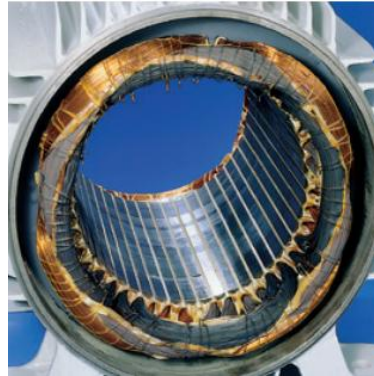


Figura 5 - Exemplo de motor queimado por alimentação desequilibrada [14]

- **Arranques diretos e operação em sobrecarga:** arranques diretos podem induzir correntes de quatro a dez vezes superiores à corrente nominal, além de esforços mecânicos nas bobinas. Assim, a presença de altas correntes nos enrolamentos do estator, seja por arranque direto ou sobrecarga, pode comprometer o isolamento dos enrolamentos. Já os esforços mecânicos nas bobinas podem causar danos ao isolamento ou fraturas nos condutores da mesma - a Figura 6 representa um motor queimado por sobreaquecimento;



Figura 6 - Exemplo de motor queimado por sobreaquecimento [14]

- **Sobretensão na alimentação:** seja por descargas atmosféricas ou funcionamento de diversos equipamentos de proteção nos circuitos de alimentação, o aparecimento de sobretensões podem ameaçar a integridade do isolamento dos enrolamentos – a Figura 7 representa um motor queimado por pico de tensão;



Figura 7 - Exemplo de motor queimado por pico de tensão [14]

- **Esforços mecânicos:** a presença de peças soltas no interior do motor, vibrações e contato do rotor com o estator (excentricidade ou barras partidas) podem danificar os enrolamentos – a Figura 8 ilustra um motor queimado por rotor travado;



Figura 8 - Exemplo de motor queimado por rotor travado [14]

- **Agentes externos:** degradação causada pela contaminação por humidade, óleo, areia, acumulação de pó, ferrugem ou outros resíduos e ação corrosiva de produtos químicos;
- **Descargas parciais:** estão presentes num motor, cujo isolamento já está em estado de degradação, e as descargas parciais aceleram o processo sendo consideradas um indicador de degradação do isolamento;
- **Envelhecimento:** é a degradação natural do material utilizado no isolamento dos enrolamentos. O agravamento das falhas presentes nos enrolamentos pode levar a três tipos de queima dos enrolamentos:
 - Queima simétrica pelo sobreaquecimento de todas as fases;
 - Queima assimétrica por *single-phasing*;
 - Queima não simétrica por um enrolamento à terra.

2.1.4.3. Rotor

Existem duas configurações para rotores em motores de indução: o rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado.

Se o rotor for bobinado, o seu circuito é composto por enrolamentos semelhantes ao estator, alojados em ranhuras existentes no núcleo. Os terminais desses enrolamentos são acessíveis externamente com anéis coletores, permitindo assim o controlo do comportamento do motor através de resistências externas escolhidas. Neste caso, os enrolamentos do rotor estão sujeitos aos mesmos efeitos de degradação do isolamento, vistos anteriormente para enrolamentos do estator, além dos esforços mecânicos em decorrência da sua rotação.

Neste trabalho apenas será estudado o rotor com a tipologia gaiola de esquilo. Este tipo de rotor é constituído por uma estrutura similar à ilustrada na Figura 9. Esta estrutura é composta por barras de um material condutor, anéis terminais que curto-circuitam as extremidades das barras, normalmente é utilizado alumínio ou cobre, e um núcleo de material magnético. Nas possíveis avarias no rotor, destacam-se as

fraturas das barras rotóricas, particularmente na região dos anéis de curto-circuito. Este tipo de falha representa cerca de metade do total de falhas apresentadas no rotor.

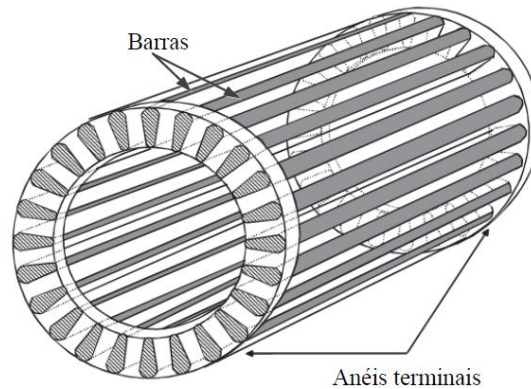


Figura 9 – Ilustração de estrutura tipo de um rotor de um motor de indução trifásico [15]

Estas falhas estão normalmente associadas aos seguintes fenômenos [16]:

- Sobrecargas térmicas e/ou distribuições não uniformes de temperatura na gaiola;
- Ruído e vibrações, forças eletromagnéticas excessivas sobre as barras e anéis;
- Imperfeições de construção;
- Perturbações dinâmicas causadas pelas cargas acionadas e/ou pelos ciclos de funcionamento;
- Causas ambientais;
- Falhas mecânicas.

Quando ocorre este tipo de falha o motor poderá funcionar ainda durante algum tempo. Contudo à medida que a fratura aumenta, a barra que está danificada pode sobressair e com isso causar danos graves na máquina. A quebra de uma barra impede a circulação de corrente nesse “trajeto”. Se existirem correntes entre barras a detecção desta falha é bastante mais complicada, uma vez que tais correntes atenuam o desequilíbrio provocado pelas barras partidas [17].

Excentricidade

A presença de excentricidades causa irregularidades no campo girante entre o rotor e o estator. Esta falha pode causar grandes danos na máquina se o seu aparecimento for negligenciado. Nos dois tipos de rotor, o bobinado e o de gaiola de esquilo, a excentricidade do entreferro resulta no aparecimento de uma região com *airgap* mínimo e outra de *airgap* máximo. As duas regiões estão evidenciadas na Figura 10, onde é possível observar os centros geométricos do estator (C1) e do rotor (C2) que deixam de ser coincidentes.

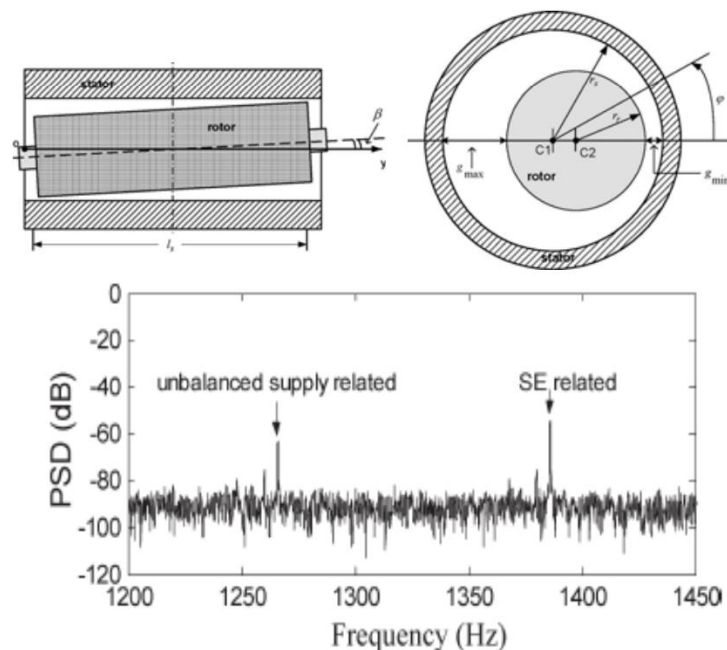


Figura 10 – Exemplo de excentricidade estática e espectro de frequência da corrente de alimentação [18]

A manifestação desta irregularidade dá origem a um desequilíbrio das forças radiais, à passagem de corrente elétrica através dos rolamentos, a ruído e aumento da vibração, provocado por uma frequência igual ao dobro da frequência de rede (100 Hz). A amplitude da vibração aumenta com a carga e é anulada quando a alimentação do motor é desligada.

As causas mais comuns para este tipo de excentricidade incluem imperfeições no processo de manufatura, rotor e eixo não concêntricos, núcleo do estator oval e empeno térmico do rotor.

Há três tipos de excentricidade, a estática, a dinâmica e a mista. A primeira é caracterizada pelo centro de rotação (O_R) ser coincidente com o centro geométrico do rotor (O_r) e estes estão deslocados relativamente ao centro geométrico do perímetro interno do estator (O_E). A excentricidade dinâmica tem como características a posição do centro geométrico do rotor (O_r) que se encontra deslocado relativamente ao centro de rotação (O_R). Na prática, a excentricidade dinâmica representa uma modulação do entreferro na frequência de rotação do rotor. Estes dois tipos de excentricidade tendem a coexistir, surgindo assim o terceiro tipo de excentricidade, a mista. Na Figura 11 estão representadas três condições de excentricidade. Na presença de excentricidade o rotor não permanece centrado com o estator e a distribuição de campo magnético no entreferro não é simétrica, surgem vibrações, ruídos e uma força de atração magnética desequilibrada (*UMP*) [19],[15].

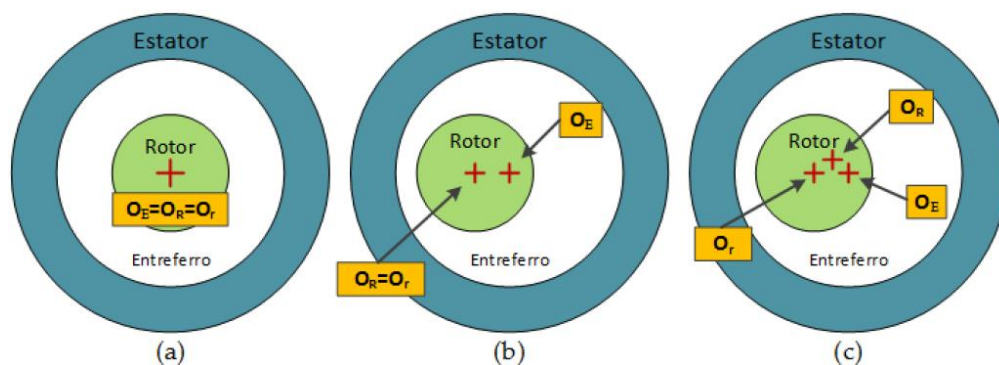


Figura 11 – Condições de excentricidade: a) excentricidade nula b) excentricidade estática e b) excentricidade dinâmica.

As causas mais comuns de excentricidade são imperfeições no processo de manufatura, rotor e eixo não concêntricos, núcleo do estator oval e empeno térmico do rotor. A Figura 12 representa uma deformação presente no eixo e no rotor, respetivamente.

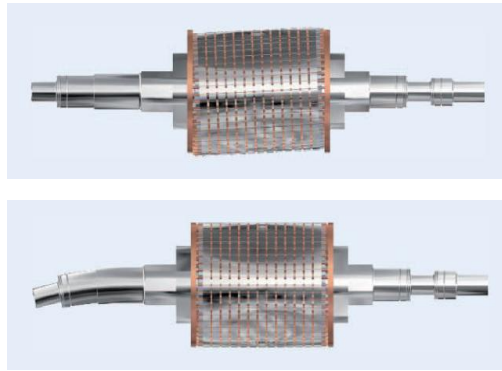


Figura 12 – Exemplo de deformação do eixo e do rotor, respetivamente [20]

Avarias no eixo

Os falhas no eixo, decorrentes de esforços mecânicos (como fraturas e empenos), representam uma percentagem significativa do total de falhas no rotor. Estes esforços são consideráveis em regimes transitórios e resultam do regime de operação imposto pela carga e pela alimentação.

2.2. Panorama da Manutenção

O termo manutenção é entendido como a ação de reparar ou executar serviços benéficos em equipamentos e sistemas. Tais ações têm o único objetivo de garantir que os equipamentos continuam a executar as suas atividades sem que as mesmas sejam interrompidas. Quando a indústria ainda tinha pouca maquinaria, as atividades de manutenção resumiam-se apenas a reparar algum equipamento danificado, sendo esta manutenção apenas encarada como corretiva. Neste período não existia qualquer dimensionamento para a aplicação da maquinaria, na maioria das ocasiões o equipamento era superdimensionado.

A partir da década de 1940, impulsionada pela guerra e pela necessidade de autonomia industrial, em muitos países existiu uma grande mudança no *modus operandi* na indústria. Houve um aumento da mecanização e complexidade das instalações industriais, com a produção em larga escala, a ser a nova realidade. Esta

nova necessidade da disponibilidade e fiabilidade dos equipamentos, obrigatoriamente, trouxe uma nova modalidade de manutenção chamada preventiva. Nesta modalidade a substituição de equipamentos e peças era feita antes do equipamento avariar, e de provocar uma paragem intempestiva, e era equacionada com base no tempo de vida expectável dos mesmos.

Em meados da década de 1970, deu-se o início da economia de mercado, caracterizada pela maior competitividade económica, onde as indústrias começaram a preocupar-se com o lucro: procura de maiores ganhos através do aumento da produção, minimização de custos e minimização de perdas. Desta forma, surgiu a necessidade de uma manutenção onde possíveis falhas pudessem ser identificadas antes de causarem paragens na produção. Este modelo, chamado manutenção preditiva, baseia-se na monitorização sistemática de parâmetros de condição ou desempenho de um processo ou equipamento. Com base nisso, era possível antever uma possível quebra de rendimento ou paragem e com estes dados realizar o devido planeamento das atividades a realizar.

Hoje, o conceito de manutenção é ainda mais abrangente, pois tem o objetivo de diminuir a ocorrência de falhas nos equipamentos e aumentar a sua disponibilidade através da redução das hipóteses de ocorrerem falhas de operação. Isso é obtido com a determinação clara dos requisitos de fiabilidade, segurança, preservação do meio-ambiente e os custos associados ao equipamento. As empresas atualmente estão a orientar os seus processos para *Lean Manufacturing*, que consiste na redução de *stock* e torna a fiabilidade dos equipamentos crucial. Como consequência, falhas nos processos e nos equipamentos geram maiores perdas de produção e maiores custos de reparação.

2.2.1. Estratégias de Manutenção

As técnicas de manutenção têm evoluído conforme as necessidades de produção das indústrias. Hoje, a necessidade de manutenção solicitada por um equipamento depende diretamente da sua correta especificidade, além da

determinação exata da sua função. Tendo isso em conta, é possível determinar o método mais eficaz e de menor custo a ser utilizado na manutenção desse equipamento.

As atividades, ou estratégias, de manutenção podem ser classificadas em quatro grupos: manutenção corretiva, manutenção preventiva, manutenção preditiva e manutenção proactiva. Uma breve definição de cada uma, bem como algumas das suas características, será apresentada a seguir:

- **Manutenção Corretiva:** é a forma mais primária de manutenção, pois só é realizada após a ocorrência da falha e pode envolver grandes perdas. Além do custo envolvido na correção, a falta de disponibilidade do equipamento acarreta possíveis perdas de produção e paragem de todo o processo. Por fim, uma avaria não esperada pode representar um risco para a segurança dos trabalhadores.
- **Manutenção Preventiva:** também chamada de periódica, é baseada numa agenda de uso ou tempo de vida do equipamento. Tem a vantagem de prevenir falhas, no entanto envolve a paragem do equipamento. Mesmo que feita com critério, peças ou equipamentos ainda podem falhar antes ou depois do tempo previsto. No primeiro caso, uma falha não é evitada e, no segundo, há o custo de manutenção feita desnecessariamente. Além dos custos envolvidos na paragem do processo, há custos fixos associados à mão-de-obra e ao *stock* de peças e equipamentos. Ainda existe a possibilidade de danos no equipamento durante a sua manutenção. Quando esta modalidade é aplicada a sistemas críticos, onde é feita troca de uma peça ou equipamento rigorosamente após o seu tempo previsto (independente da sua condição), dá-se o nome de **Manutenção Sistemática**.
- **Manutenção Preditiva:** nesta modalidade, as técnicas de monitorização e análise, que visam a reconhecer o desenvolvimento de falhas ainda em um estado inicial, são aplicadas ao equipamento e, portanto, reduzem perdas com reparações desnecessários e paragens não programadas. Este tipo de manutenção envolve técnicas não-invasivas de monitorização e utiliza tecnologias como: análise de vibração, termografia, análise da corrente

elétrica, análise de filme de óleo, e análise da tendência de crescimento de parâmetros como temperatura, pressão, etc.

- **Manutenção Proactiva:** esta manutenção é dita proactiva porque se preocupa em identificar e remover a causa das falhas. Para isso utiliza técnicas que analisam o equipamento e o processo. Técnicas de instalação de equipamentos, alinhamento e balanceamento de motores e cargas, redesenho de máquinas e processos são alguns exemplos das tecnologias empregadas.

Atualmente, o tempo aplicado em manutenção está repartido da forma ilustrada na Figura 13.

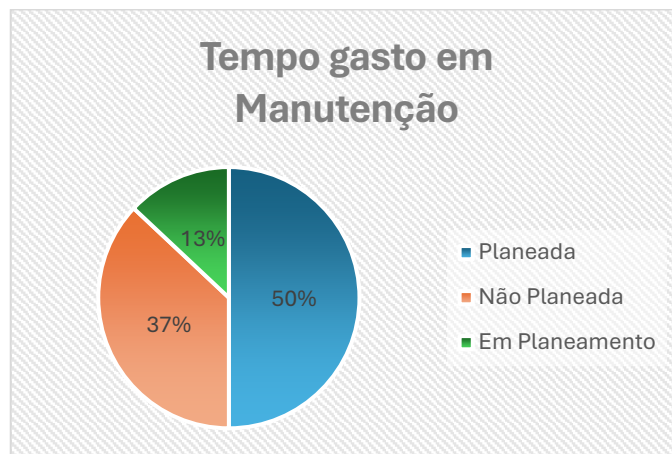


Figura 13 – Percentagem de Tempo gasto em Manutenção [21]

A manutenção corretiva representa ainda 50% do total praticado, apesar das suas desvantagens. Nos países de primeiro mundo, as empresas estão mais concentradas nas práticas de manutenção preditiva, contudo a maioria ainda faz manutenção corretiva. Apesar do custo anual ser reduzido, a aplicação de técnicas avançadas de manutenção ainda exige investimento em equipamentos e formação de técnicos.

2.2.2. Técnicas Avançadas de Manutenção

Com o aparecimento de fábricas maiores e mais complexas, há maior dificuldade (ou impossibilidade) do controlo humano e maior necessidade de sistemas automáticos e de monitorização de processo. Neste cenário, a reparação dos equipamentos tem um custo elevado porque é necessária uma mão-de-obra especializada para a execução da manutenção, os requisitos de qualidade do produto também são elevados, não sendo permitido qualquer tipo de alteração ou desvio. Assim a utilização de tecnologias avançadas tornou-se uma necessidade.

As técnicas de manutenção disponíveis no âmbito industrial podem ser classificadas da seguinte forma:

- **Monitorização de Condição:** nesta abordagem o objetivo é identificar e monitorizar o estado de funcionamento da máquina, para detetar as falhas antes delas ocorrerem. Assim, é possível evitar eventos catastróficos para a produção e aumentar a disponibilidade dos equipamentos. Esta técnica tem como foco principal o estado operacional do equipamento e envolve sistemas automáticos ou de auxílio de monitorização.
- **Manutenção Centralizada na Fiabilidade:** técnica usada para determinar os requisitos de manutenção de qualquer equipamento no contexto de operação. É necessário identificar as funções dos componentes críticos, falhas funcionais, tipos de falhas, consequências das falhas e ações apropriadas de manutenção. Assim é possível garantir a operação de um dado equipamento dentro de determinados requisitos de fiabilidade previamente determinados.
- **Manutenção baseada em Modelos:** esta abordagem depende do modelo matemático do sistema, e envolve métodos analíticos de redundância ou métodos de estimação de parâmetros. De uma maneira geral, estes são pouco robustos devido a não linearidades, mudanças de estação ou degradações naturais da instalação.
- **Manutenção não baseada em Modelos:** esta técnica envolve as outras tecnologias, que incluem, técnicas de estatística, verificação de limites, cartas de controlo e análise de ruído e espectro (vibração, corrente, etc.).

A aplicação da maioria das técnicas listadas acima é orientada a sistemas automáticos de medição, análise e diagnóstico. Estes sistemas envolvem, quando necessário, algum envolvimento por parte de operadores e/ou especialistas. Um sistema de monitorização de falhas deve detetar a presença e a causa de falhas, determinar o grau de severidade e, por fim, emitir algum tipo de alarme ou ação corretiva a efetuar. O grau de fiabilidade de um sistema de monitorização automático depende das seguintes variáveis:

- Número de falhas não detetadas;
- Número de falsos alarmes de falhas;
- Tempo entre a ocorrência de falha e a sua deteção;
- Exata estimação dos parâmetros de falha (localização, severidade e tempo de ocorrência);
- Sensibilidade a diferentes tipos de falhas.

Assim, de um ponto de vista geral da manutenção, este tipo de sistema acrescenta um aumento na probabilidade de se completar uma tarefa de manutenção com sucesso e no tempo previsto, um aumento na facilidade e segurança da execução dos trabalhos de manutenção.

2.2.3. Impacto Económico e Operacional

As falhas em motores de indução representam um desafio significativo para a indústria, com impactos que transcendem o custo direto de reparação ou substituição do equipamento. O impacto económico total de uma falha não detetada pode ser decomposto em custos diretos, indiretos e intangíveis.

Custos diretos:

- Reparo ou substituição do motor;
- Mão-de-obra para intervenção;
- Peças sobressalentes;
- Logística associada à manutenção emergencial.

Custos indiretos:

- Perda de produção durante o tempo de inatividade;
- Danos a equipamentos adjacentes;
- Perda ou contaminação de produtos em processo;
- Penalidades contratuais por atrasos em entregas;
- Impacto na qualidade do produto final.

Custos intangíveis:

- Impacto na reputação da empresa;
- Redução da confiança dos clientes;
- *Stress* organizacional devido a situações emergenciais;
- Potenciais impactos ambientais ou de segurança.

Os estudos documentados na literatura indicam que o custo total de uma falha não detetada pode superar em três a cinco vezes o valor do próprio motor. Em indústrias de processo contínuo, o impacto é particularmente severo, com custos de inatividade que podem variar, dependendo do setor específico e da criticidade do equipamento.

A implementação de sistemas eficazes de detecção precoce de falhas, como os baseados em análise de vibração com acelerómetros triaxiais, representa um investimento estratégico com potencial de retorno significativo [22], nomeadamente:

- Redução de 70-80% nas paragens não programadas;
- Aumento de 25-30% na vida útil dos equipamentos;
- Otimização dos recursos de manutenção, com redução de 20-25% nos custos diretos;
- Minimização de danos colaterais resultantes de falhas catastróficas.

2.3. Técnicas de Manutenção Aplicadas a Motores de Indução

Como o motor de indução é amplamente utilizado, as questões relativas à sua manutenção recebem muita atenção por parte de investigadores, de utilizadores e dos próprios fabricantes. No contexto das práticas atuais de manutenção, estas questões estão ligadas ao desenvolvimento de métodos de monitorização da condição e de diagnóstico de falhas, dando especial atenção às técnicas remotas, não invasivas e sem interrupção da produção.

Com base no procedimento de aplicação, os métodos de diagnóstico podem ser classificados em *offline* e *online*. O primeiro implica operações efetuadas com o motor parado, para que as condições estejam reunidas para a execução da tarefa. O segundo proporciona a obtenção do diagnóstico com o motor em funcionamento, tratando-se do mais desejável a ser aplicado na indústria. A Tabela 3, demonstra uma visão das técnicas aplicadas em cada uma das situações e a sua classificação de acordo com a sensibilidade (alta ou baixa) na deteção de falhas, nos diferentes aspetos e componentes que envolvem o conjunto eletromecânico [23], [24].

Tabela 3 - Tabela comparativa entre as técnicas de diagnóstico offline e online.

	PQ (Power Quality)	Controlo	Ligação	Cabo	Estator	Rotor	Air Gap	Retentores	$I_{pico}/I_{nominal}$	Vibração	Alinhamento	Carga	Drive
TESTES OFF-LINE													
Teste de Alto Potencial									X				
Teste de Bobinas					X								
Teste de Isolamento (Megger)									X				
Ohmímetro (Continuidade Circuito)			L		L								
Teste do Índice de Polarização									X				
Teste MCA		X	X	X	X	X	X		X				
TESTES ONLINE													
Análise de Vibração					L	L	L	X		X	X	X	
Termografia	X	X	X	L	L			L			L	L	
Ultrassónico		L			L			X				L	
Volt/Ampère	L	L	L		L	L							
MCSA	X	X	L		L	X	X	L		X	X	X	L

No diagnóstico de falhas em motores de indução, as técnicas de monitorização da condição regularmente utilizadas são as que se seguem.

Técnicas offline:

- **Teste de Alto Potencial:** é injetada uma tensão alta e contínua nos enrolamentos com o objetivo de avaliar o isolamento entre os enrolamentos e a terra. Este teste é potencialmente destrutivo.
- **Teste de Isolamento:** uma pequena tensão contínua é aplicada entre os enrolamentos e a terra. A corrente de fuga é então medida e convertida numa medida de impedância em Ω s.
- **Teste de Resistência:** através de um medidor de resistência, medidas entre os enrolamentos do estator são feitas com o intuito de se identificar perda ou quebra de conexões, bem como problemas em estado avançado nos enrolamentos.
- **Análise do Circuito do Motor (MCA):** através da leitura de medidas de impedância, ângulo de fase, corrente, resposta em frequência, etc., avalia-se as conexões, cabos, rotor, entreferro e isolamento. Este teste permite a detecção de falhas elétricas incipientes.

Técnicas online:

- **Análise de Vibração:** fornece medidas de níveis globais e análise espectral das vibrações no motor através de um acelerómetro. Esta técnica está bastante difundida no meio industrial, e requer conhecimento das características do sistema em teste sendo utilizada na identificação da presença e severidade de falhas de origem mecânica no motor, rolamentos e em todo o conjunto eletromecânico. Também, provê alguma informação de problemas elétricos e problemas no rotor.
- **Análise Termográfica (Termografia):** com a introdução de câmeras fotográficas de infravermelho, é possível obter mapas de temperatura do motor e dos equipamentos a ele acoplados. Tem uma grande eficiência para a detecção de mau contato em conectores e as demais falhas elétricas, além de apresentar boa capacidade de identificação de falhas mecânicas e de fadiga de materiais.
- **Análise Acústica:** através da análise de ruído de baixa e alta frequência, detetam-se diversos problemas elétricos e mecânicos já num estado

avançado de falha. Bastante dependente do conhecimento das características do sistema em teste.

- **Medidas Elétricas:** com as medidas de corrente e tensão, obtêm-se informações limitadas sobre a condição de operação do motor e de sua alimentação.
- **Análise da Assinatura Elétrica (MCSA):** é a técnica mais recente. Esta envolve técnicas espectrais baseadas na análise da corrente. Utiliza o motor como transdutor para detetar a presença e a gravidade das falhas elétricas e mecânicas e boa parte do conjunto eletromecânico, especialmente no rotor. Requer informações do sistema em teste e, numa análise avançada, informações construtivas do motor como o número de barras do rotor.

Note-se que em todas as técnicas *online* vistas acima, as grandezas medidas variam com a carga. Isso implica que a qualidade dos resultados depende de condições de carga e das medições efetuadas em condições iguais de operação [25].

Tendo em conta esta análise, obteve-se melhores resultados combinando a aplicação de duas ou mais técnicas em conjunto. Nos dias de hoje, em ambiente industrial, as abordagens mais utilizadas são:

- **Vibração e Termografia:** esta combinação de técnicas oferece uma boa e abrangente solução, contudo alguns problemas comuns só serão detetados em estado avançado.
- **MCA e MCSA:** é a combinação de técnicas que potencialmente detetam qualquer tipo de falha, contudo a utilização de *MCA*, além da necessidade de desligar o motor, envolve uma panóplia de testes.
- **Vibração, Termografia e MCA:** esta abordagem é a mais recente e a mais efetiva delas devido à combinação de tecnologias mecânicas e elétricas.

Na Tabela 4 encontram-se algumas combinações das técnicas de diagnóstico, que são classificadas consoante a sua sensibilidade (alta ou baixa)

na deteção de falhas nos diferentes aspetos e componentes que envolvem o conjunto eletromecânico [24].

Tabela 4 - Tabela comparativa entre as combinações das técnicas de diagnóstico

	PQ (Power Quality)	Controlo	Ligação	Cabo	Estator	Rotor	Air Gap	Retentores	$I_{pico}/I_{nominal}$	Vibração	Alinhamento	Carga	Drive
Resistência de Isolamento e Índice de Polarização				L					X				
Termografia e Vibração	L	X	X	L	L	L	L	X		X	X	X	
Teste de Bobinas e Alto Potencial					X				X				
MCA e MCSA	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MCA e Termografia/Vibração	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	L

Por fim, é importante ressaltar que, das técnicas *offline*, o teste de alto potencial e de resistência exigem que o motor seja não só desligado, como desacoplado mecanicamente. De todas as técnicas, nota-se que apenas o teste de isolamento, as medições elétricas, a MCA e a MCSA podem ser feitas remotamente, da sala do MCC, enquanto as outras necessitam de ser efetuadas no local.

Esta última característica justifica estudos e os investimentos aplicados no aprofundar da técnica MCSA, visto que de todas as técnicas vistas, é a única que reúne a capacidade de ser remota e *online*.

Qualquer diagnóstico à máquina depende da leitura das saídas e entradas de valores, quando necessário, de todo o sistema. No caso do motor, estas saídas são bastante variadas. Na manutenção, há alguns anos, o diagnóstico de falhas era realizado por um técnico experiente que, habituado às características de operação, identificava as alterações (ruído, temperatura por exemplo) através dos seus sentidos. Hoje através da utilização de sensores apropriados, existem diversos métodos de diagnóstico, baseados nas diversas grandezas presentes num motor. As grandezas podem ser corrente elétrica, fluxo magnético, vibrações, ondas acústicas, temperatura e fluídos de lubrificação ou refrigeração.

A análise das leituras retiradas das grandezas do motor e da forma como elas se alteram no decorrer da vida útil do motor, constituem um princípio básico de diagnóstico das falhas, ou seja, comparando as características atuais com as

mesmas características conhecidas com o motor saudável em operação, consegue-se comparar e traçar o padrão de funcionamento. A extração de parâmetros e características para diagnóstico pode envolver as seguintes ferramentas e princípios:

- Análise temporal;
- Análise espectral;
- Análise *wavelet*;
- Análise com base em modelos;
- Análise estatística.

Com o aumento de sistemas de aquisição de dados e dos sistemas autônomos capazes de executar modelos matemáticos de processamento de sinais e algoritmos de identificação de padrões, a aplicação das análises teve um grande impulso.

2.4. Revisão de Literatura sobre Detecção de Falhas em Motores

A detecção de falhas em motores de indução tem sido objeto de uma pesquisa intensiva nas últimas décadas, com avanços significativos tanto em técnicas de monitorização quanto em algoritmos de diagnóstico. Esta secção apresenta uma revisão crítica da literatura recente, com foco em trabalhos publicados em revistas científicas e conferências.

Uma abordagem sobre técnicas de detecção de falhas em rolamentos de motores de indução utilizando análise de vibração é destacado que a distribuição de falhas nos motores de indução mostra que falhas em rolamentos são as mais prováveis de ocorrer, com uma percentagem significativa que pode atingir um valor significativo do total de falhas. O trabalho comparou três técnicas de diagnóstico: análise espectral tradicional, decomposição em modos empíricos e Transformada

Wavelet, concluindo que abordagens híbridas ofereciam os melhores resultados em termos de sensibilidade e especificidade [5].

Uma técnica inovadora baseada em *machine learning* para detecção de falhas no estator utilizando assinaturas de vibração, os autores implementaram uma abordagem não invasiva baseada em dados, utilizando técnicas de análise estatística para otimizar o processo de extração de características. Os resultados experimentais demonstraram taxas de detecção superiores a 97% para falhas incipientes no estator, mesmo em condições de carga variável [26].

Uma abordagem específica para a detecção de barras partidas no rotor, utilizando a análise de vibração, apresentou um caso real de detecção de falhas num motor de indução de alta potência (3,2 MW) numa central térmica. Os autores utilizaram sinais de vibração em regime permanente para detecção de falhas, demonstrando a viabilidade da técnica em aplicações industriais de grande escala [27].

Uma estratégia baseada em redes neurais convulsivas para diagnóstico de falhas de motores de indução, utilizando sinais de vibração, foi utilizada num trabalho que destacou que de acordo com as características da força eletromagnética e da vibração, quando ocorre excentricidade do rotor e barras partidas, os sinais de vibração exibem padrões específicos que podem ser detetados através de técnicas avançadas de processamento de sinais. Os autores relataram taxas de acerto superiores a 99% na classificação de múltiplos tipos de falhas [28].

A análise de vibração é uma ferramenta eficiente não apenas para diagnóstico de problemas mecânicos, mas também para detecção de anomalias elétricas em motores de indução. O estudo apresentou evidências experimentais de que as falhas elétricas, bem como os curto-circuitos entre espiras no estator, produzem padrões vibratórios característicos que podem ser detetados e classificados com precisão [29].

A combinação de técnicas de vibração e análise de corrente do estator para detecção de falhas em motores de indução já foram objetos de estudo. Os autores concluíram que as vibrações mecânicas estão consolidadas na indústria como a principal ferramenta para diagnóstico de falhas em máquinas elétricas rotativas, mas que a abordagem combinada oferecia maior robustez e capacidade de diagnóstico em condições operacionais variáveis [3].

A utilização de acelerômetros para a monitorização da condição em motores de indução tem evoluído significativamente, sendo impulsionada por avanços tecnológicos nos sensores e nas técnicas de processamento de sinais.

Os acelerômetros, com a tecnologia *MEMS*, são utilizados para a detecção de falhas elétricas em motores de indução trifásicos do tipo gaiola de esquilo, através de análise de vibração. Os autores desenvolveram instrumentação baseada em acelerômetros e propuseram uma técnica para detecção de condições elétricas anormais. Este trabalho foi particularmente significativo por demonstrar a viabilidade de sensores de baixo custo para aplicações industriais de monitorização de condição [30].

A evolução nos sistemas baseados na análise de vibrações é constante, sendo um exemplo desses sistemas o *ORS*, sigla para *On Rotor Sensing*, que consiste na implementação de um acelerómetro triaxial diretamente no rotor com um módulo *Bluetooth* de baixa energia. Esta aplicação tem o objetivo de reduzir as saídas sem comprometer a capacidade de detecção de falhas. Os autores demonstraram que, através de técnicas adequadas de processamento de sinais, era possível otimizar a quantidade de dados transmitidos sem perda significativa de informação de diagnóstico, aspeto particularmente relevante para implementações com comunicação sem fios e restrições energéticas. Estes estudos demonstraram, que este tipo de abordagem apresenta vantagens significativas para detecção de certos

tipos de falhas, particularmente aquelas relacionadas a com desequilíbrios no rotor e excentricidade [31],[32].

É amplamente reconhecida a aplicação de acelerómetros triaxiais para explorar o diagnóstico multi-classe de falhas em motores de indução, alimentados por inversores de frequência variável, numa ampla faixa operacional (5-50 Hz). A investigação demonstrou que a análise de características coletivas extraídas dos três eixos de medição proporcionava capacidade de diagnóstico superior em comparação com abordagens baseadas em eixos individuais, especialmente em condições de velocidade e carga variáveis [4].

A abordagem multi-sensor permite a discriminação mais precisa entre diferentes fontes de vibração. Os autores propuseram uma abordagem inovadora para a deteção e caracterização de falhas elétricas e mecânicas em motores de indução, acoplamentos e cargas, baseado na análise espectral de sinais de velocidade e posição, obtidos através da combinação de acelerómetros e sensores de efeito de *Hall* [6].

Trata-se, assim, de uma visão abrangente sobre sensores de vibração para a monitorização do estado de condição, com foco nos dispositivos e métodos utilizados para a aquisição de dados. O trabalho realizado destacou a evolução dos acelerómetros, desde os tradicionais piezoelétricos até os sensores mais modernos como a tecnologia *MEMS*, com capacidade de comunicação sem fios, e discutiu as implicações desta evolução para implementação de sistemas de manutenção preditiva em ambientes industriais [22].

2.4.1. Fundamentos do *Condition-Based Maintenance* e Tipologias de Falhas

A Manutenção Baseada na Condição (CBM), é uma estratégia preditiva onde a manutenção é realizada apenas quando existe evidência de que o desempenho de um ativo está a degradar-se. O objetivo é intervir apenas quando necessário, mas antes que a falha ocorra.

Cada técnica de monitorização possui pontos fortes e fracos, dependendo do tipo de falha a detetar.

Motor Current Signature Analysis (MCSA)

A Análise de Assinatura de Corrente do Motor é uma técnica não invasiva que se baseia na deteção de componentes espectrais características na corrente de fase de alimentação do motor [33]. Esta demonstra ser altamente sensível a falhas elétricas, como o curto-circuito de espiras no estator (*ITSC*) e as barras do rotor partidas (*BRB*), uma vez que estas falhas modulam diretamente o campo magnético, produzindo assinaturas de frequência lateral bem definidas na corrente de fase [34].

O princípio de funcionamento desta técnica consiste no facto de que qualquer assimetria no circuito magnético do motor (seja por falhas no estator ou rotor) altera a forma de onda da corrente de alimentação, introduzindo componentes na frequência característica que podem ser identificadas através da análise do espectro. As principais vantagens da análise de assinatura de corrente do motor incluem:

- Natureza não invasiva que necessita apenas que os condutores alimentam o motor;
- Possibilidade de monitorização contínua sem interferência na operação da máquina;
- Os sensores a serem utilizados são de relativa simplicidade (sensores de efeito de Hall);

- Resultados comprovados na detecção de falhas elétricas.

A MCSA apresenta limitações significativas, especialmente em aplicações com cargas variáveis ou alimentação por inversores de frequência, onde os harmônicos gerados podem disfarçar os sinais indicativos de falhas [35].

Análise de Vibração

A análise de vibração constitui uma das técnicas mais versáteis e eficazes para detecção de falhas em motores de indução. As vibrações mecânicas estão consolidadas na indústria como a principal ferramenta para diagnóstico de falhas em máquinas elétricas rotativas, devido à sua eficácia na detecção precoce e à sua capacidade de fornecer evidências diretas sobre a condição do equipamento [3]. Esta técnica é o pilar da Manutenção Preditiva, pois baseia-se no princípio de que qualquer anomalia no funcionamento do motor produz padrões vibratórios característicos que podem ser detetados, medidos e analisados.

A análise de vibração é uma técnica eficiente não apenas para diagnóstico de problemas mecânicos, mas também para detecção de anomalias eletromagnéticas [29]. As vantagens desta abordagem incluem a capacidade de detecção de uma ampla gama de falhas (mecânicas e elétricas), a sua natureza não invasiva, a possibilidade de monitorização em contínuo, a capacidade de detecção precoce de falhas que estão em fase inicial e a disponibilidade de grande quantidade de dados adquiridos para interpretação na obtenção de resultados.

Na implementação da técnica de análise de vibração, são utilizados acelerómetros como sensores mais comuns, pois estes convertem vibrações mecânicas em sinais elétricos proporcionais. Os acelerómetros triaxiais oferecem vantagens significativas ao permitir a medição simultânea de vibrações nos três eixos

ortogonais, fornecendo uma visão tridimensional do comportamento vibratório do motor [4].

Além disso, a vibração é um sinal complementar que capta a manifestação mecânica das forças eletromagnéticas desequilibradas geradas por falhas elétricas de rotor e estator, sendo crucial para o diagnóstico sob condições operacionais variáveis, exemplo flutuação da carga.

Análise do Fluxo Magnético

A análise do fluxo magnético baseia-se na medição das alterações do campo magnético externo ao motor, utilizando sensores de efeito de *Hall*. Com o auxílio destes sensores conseguem-se detetar as assimetrias no campo magnético resultante de falhas no estator ou rotor. As vantagens desta abordagem resumem-se à sensibilidade a falhas elétricas incipientes, à capacidade de localização precisa de falhas no estator e à sua natureza não invasiva. A sua aplicação prática é limitada pelos seguintes fatores:

- Necessidade de sensores especializados;
- Suscetibilidade a interferências eletromagnéticas externas;
- Complexidade na interpretação dos sinais.

Análise por Termografia

A análise termográfica (é possível verificar um exemplo na Figura 14) baseia-se na deteção de padrões térmicos anómalos utilizando câmeras de infravermelho. Esta técnica é particularmente eficaz para identificação de problemas que resultam em aquecimento localizado, tais como conexões elétricas deficientes, curtos-circuitos em estado inicial no estator, problemas em rolamentos e obstruções no sistema de ventilação.

As principais vantagens desta abordagem incluem:

- Natureza não invasiva e sem contato;
- Capacidade de inspeção rápida de múltiplos equipamentos;
- Facilidade de interpretação visual dos resultados.

Entretanto, apresenta limitações como:

- Detecção apenas de falhas que geram aquecimento significativo;
- Necessidade de acesso visual ao equipamento;
- Influência de condições ambientais nos resultados;
- Custo relativamente elevado dos equipamentos de medição.

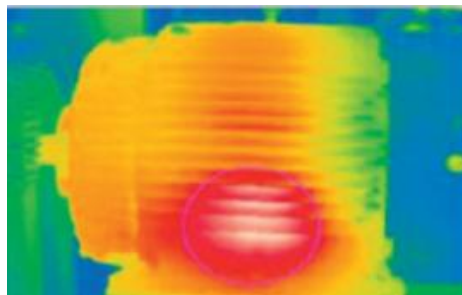


Figura 14 - Exemplo de termografia a um motor de indução trifásico, com aumento de temperatura na carcaça que pode gerar problemas futuros no enrolamento [36]

Comparação entre Técnicas

A escolha da técnica mais adequada para detecção de falhas em motores de indução depende de diversos fatores, incluindo o tipo de falha a ser detetada, as condições operacionais, as restrições de acesso ao equipamento e os recursos disponíveis. A Tabela 5 demonstra uma comparação entre técnicas de detecção de falhas

Tabela 5 - Comparação entre técnicas de detecção de falhas em motores de indução [25], [37], [38]

Técnica	Falhas no Rotor	Falhas no Estator	Falhas nos Rolamentos	Natureza Invasiva	Complexidade de Implementação
Análise de Corrente	ALTA	MÉDIA	BAIXA	NÃO INVASIVA	MÉDIA
Análise de Fluxo Magnético	ALTA	ALTA	BAIXA	NÃO INVASIVA	ALTA
Análise de Vibração	ALTA	MÉDIA	ALTA	NÃO INVASIVA	MÉDIA
Análise Termográfica	BAIXA	MÉDIA	MÉDIA	NÃO INVASIVA	BAIXA

A conclusão metodológica é que a eficácia do *CBM* depende da integração e análise de múltiplas técnicas, frequentemente obtém-se melhores resultados, permitindo a deteção confiável de uma ampla gama de falhas em diferentes estados de evolução. Neste contexto, a análise de vibração destaca-se como uma técnica particularmente versátil, capaz de detetar tanto falhas do tipo mecânico como do tipo elétrico, especialmente quando implementadas com acelerómetros triaxiais e técnicas avançadas de processamento de sinais [39].

Este trabalho está, portanto, focado em desenvolver métodos que permitam a uma técnica (neste caso, a análise de vibração multiaxial) estender o seu poder de diagnóstico para domínios tradicionalmente reservados a outra (deteção de falhas eletromagnéticas), aumentando a fiabilidade global do sistema de monitorização.

2.4.2. Assinaturas de Falhas Elétricas em Sinais Mecânicos

Embora a Análise da Assinatura de Corrente do Motor (*MCSA*) seja a técnica de eleição para o diagnóstico precoce de falhas elétricas, os artigos estudados demonstram que o sinal de vibração é um indicador complementar e, por vezes, necessário, para a deteção destas mesmas falhas. Isto deve-se ao facto de qualquer falha de origem elétrica ou magnética que perturbe a simetria do campo eletromagnético se traduzir em forças mecânicas mensuráveis[40],[41].

- **Manifestação de Falhas de Rotor (*BRB*) na Vibração:** A quebra de barras do rotor é uma falha progressiva que resulta em desequilíbrios na distribuição da corrente do rotor e conseqüente modulação no fluxo magnético.
- **Forças Magnéticas Desequilibradas (*UMP*):** Uma barra quebrada cria uma assimetria no entreferro (*air gap*). Esta assimetria gera componentes harmónicas no fluxo magnético que, por sua vez, resultam em Forças Magnéticas Unilaterais - *UMP*. Estas forças atuam no estator, provocando deflexões e, conseqüentemente, vibração.
- **Assinaturas de Frequência:** As frequências de vibração geradas por falhas de rotor (*BRB*) estão diretamente relacionadas com as frequências laterais (f_{BRB}) –

Equação 2 - que são o foco da *MCSA*, mas manifestadas no espectro mecânico. Estas frequências laterais são tipicamente calculadas com base na frequência da rede (f_s) e no escorregamento (s) do motor.

$$f_{BRB} = f_s(1 \pm 2ks) \quad (2)$$

- **Necessidade sob Carga Variável:** Estudos mostram que, sob condições operacionais variáveis (como a flutuação de carga), a análise de vibração pode ser um método mais robusto ou, no mínimo, um poderoso complemento à *MCSA*, aumentando a fiabilidade e precisão do diagnóstico [42].
- **Manifestação de Falhas de Estator (*ITSC*) na Vibração:** As falhas no isolamento do estator, como o curto-circuito entre espiras, também levam a uma assimetria na distribuição da força radial e, portanto, causam vibração.
- **Distorção do Campo Magnético:** O *ITSC* resulta num desequilíbrio na força magneto motriz do estator. Esta distorção do campo magnético, semelhante ao efeito de barras partidas, gera as *UMP*, que são transmitidas como vibrações à carcaça do motor [43].
- **Análise Específica:** A deteção de falhas de estator é um desafio particular para a análise de vibrações, pois os sinais são frequentemente mascarados pelo ruído. No entanto, o potencial existe e tem levado à investigação de métodos específicos baseados em vibração para o diagnóstico dos curto-circuitos entre espiras.

O problema central reside na extração destas assinaturas de falhas elétricas do sinal de vibração. As técnicas tradicionais de análise de vibração podem ser insuficientes. Este facto serve de introdução direta à necessidade de aplicar uma técnica de codificação espacial como é a Transformada de *Clarke*, ao vetor de vibração. O objetivo é organizar as características da força eletromagnética desequilibrada de uma forma otimizada para o diagnóstico, tal como é feito com a corrente.

2.5. Aplicações de Acelerómetros na Monitorização do Estado de Condição

O acelerómetro é o sensor que permite a monitorização do estado de vibração de máquinas elétricas, devido à sua capacidade de medir o movimento em termos de aceleração e de operar em amplas gamas de frequência, detetando desde desequilíbrios de baixa frequência (desalinhamento) até impactos de alta frequência (falhas em rolamentos). A sua versatilidade e a relação custo-benefício em ambientes industriais consolidam o seu papel central no *CBM*.

A monitorização da vibração é frequentemente conduzida por sensores de eixo único, limitando assim a medição à direção primária do movimento (geralmente vertical ou horizontal). Contudo, esta abordagem apresenta uma limitação crítica:

- **Informação Incompleta:** Uma falha no motor pode manifestar-se com maior intensidade numa direção não primária, por exemplo a axial, devido a desalinhamentos complexos ou a rigidez da fundação da máquina. O sensor de eixo único pode falhar na deteção de uma falha em estado inicial se o seu eixo de medição não estiver alinhado com a direção da máxima vibração, o que resulta num diagnóstico tardio.

A aplicação de acelerómetros triaxiais resolve esta limitação ao capturar simultaneamente a aceleração nos três eixos ortogonais: X (horizontal/radial), Y (vertical/radial) e Z (axial).

2.5.1. Princípios de funcionamento de acelerómetros

O acelerómetro é um dispositivo que proporciona a capacidade de medir e registar a aceleração linear e angular. Esta função é necessária em muitos equipamentos e sistemas básicos utilizados em quase todas as áreas, tanto em dispositivos domésticos, como em aplicações industriais.

Os acelerômetros são utilizados em medições de aceleração gravitacional estática, o que lhes permite determinar o ângulo de desvio do objeto medido na vertical, assim como em medições de aceleração dinâmica devido a alterações que acontecem quando ocorre, movimento, impacto ou vibração, ou seja, vibrações de baixa amplitude e baixa frequência, que alcançam várias dezenas de Hz.

A medição da vibração é geralmente utilizada para diagnosticar o funcionamento de máquinas, dispositivos ou estruturas submetidas a esforços intensos, por exemplo, rotação de motores.

A sua aplicação ocorre diretamente no objeto que vibra, o que permite converter a energia da vibração num sinal elétrico, através de um transdutor, que é proporcional à aceleração momentânea do objeto. O princípio de funcionamento dos aceleradores não é complexo: mede a força de aceleração na unidade g pode medir em um, dois ou três planos.

Quando a aceleração em qualquer plano atua na direção oposta à direção do sensor, o acelerômetro medirá a aceleração com um valor negativo. Na situação inversa, a aceleração será medida com um valor positivo.

Se o acelerômetro não for afetado por nenhuma aceleração externa, o dispositivo apenas medirá a aceleração gravitacional, isto é, a força da gravidade. Supondo que o acelerômetro de 3 eixos está posicionado de tal maneira que o sensor no eixo X se dirige para a esquerda, o sensor no eixo Y para baixo e o sensor no eixo Z para a frente e não atuam forças sobre ele, então o acelerômetro exibirá os valores: $X = 0 g$, $Y = 1 g$, $Z = 0 g$. Caso, o mesmo acelerômetro, esteja inclinado para a esquerda as suas leituras indicarão: $X = 1 g$, $Y = 0 g$, $Z = 0 g$. Igualmente, quando o desvio se produz para a direita, o plano X devolve o resultado $X = -1 g$. As dependências de medição da aceleração dadas são utilizadas pelos algoritmos dos sistemas que supervisionam o acelerômetro.

2.5.2. Tipos de Acelerómetros

A seleção do tipo de acelerómetro depende de qual é o mais adequado para a deteção do espectro vibratório na aplicação pretendida, considerando sempre a gama de aceleração a ser medida, a frequência das vibrações, a precisão necessária, o ambiente de operação, o custo e o tamanho. Com a evolução contínua da tecnologia e a aplicação da tecnologia *MEMS* tem-se conseguido a redução constante do tamanho destes transdutores [44], [45]. Os tipos de acelerómetros mais utilizados são os seguintes:

- 1. Acelerómetros Capacitivos:** São os mais comuns, especialmente aplicados com a tecnologia *MEMS*. Neste tipo de acelerómetros a massa sísmica é projetada como uma placa móvel de um condensador e as placas fixas são posicionadas de forma adjacente a ela – é possível verificar o funcionamento deste tipo de acelerómetro na Figura 15. Quando ocorre uma aceleração, a massa desloca-se, alterando a distância entre as placas e por consequência a capacitância do sistema. A alteração dessa capacitância é diretamente proporcional à aceleração.

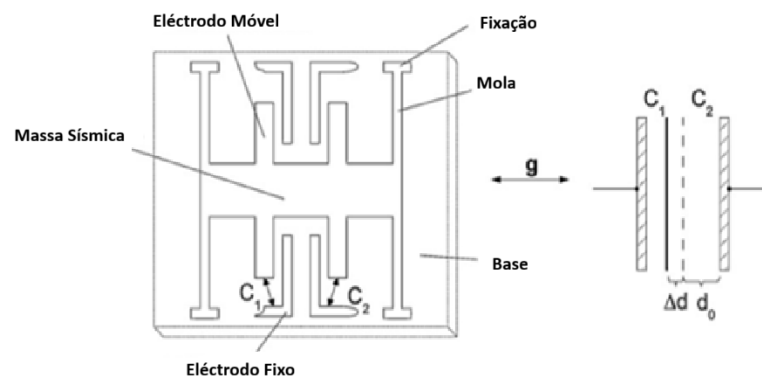


Figura 15 – Ilustração do funcionamento dos acelerómetros do tipo capacitivos [46], [47]

Este tipo de acelerómetros apresenta como vantagens a elevada sensibilidade e resolução, apresenta um tamanho reduzido, uma montagem simples, o facto de ser robusto e uma elevada banda de leitura. Como desvantagem pode apontar-se a elevada sensibilidade a temperatura e a pouca linearidade.

- 2. Acelerómetros Piezoelétricos:** Estes acelerómetros utilizam o efeito piezoelétrico, como o próprio nome indica. Este efeito consiste na utilização de

certos materiais, como cristais de quartzo, que geram uma carga elétrica quando submetidos a uma tensão mecânica. No caso destes acelerómetros uma massa é fixa a um elemento piezoelétrico, assim quando existe uma aceleração, a inércia da massa aplica uma força sobre o material piezoelétrico deformando-o e gerando uma carga elétrica proporcional à aceleração – a representação do seu funcionamento encontra-se na Figura 16. Os acelerómetros são maioritariamente utilizados em ambientes industriais na monitorização dos motores de indução. Para aplicações de deteção de falhas, os acelerómetros piezoelétricos tradicionalmente representam a escolha preferencial devido à sua ampla faixa de frequência e excelente sensibilidade. Os recentes avanços em tecnologia *MEMS* têm expandido significativamente a aplicabilidade destes dispositivos [48].

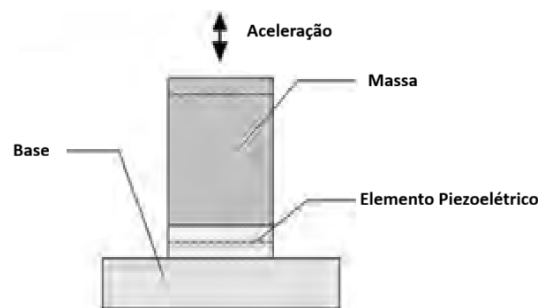


Figura 16 – Ilustração do funcionamento dos acelerómetros do tipo Piezoelétricos [46].

Como vantagens, este tipo de acelerómetros, apresentam um fácil manuseamento, uma gama de leitura elevada (Hz até KHz) e o facto de serem robustos e compactos. Em contrapartida, não medem aceleração constante, possuem uma elevada sensibilidade a temperatura e o sinal de saída possui uma elevada impedância (requer conexão específica entre sensor e processamento de sinal eletrónico que leva a um elevado custo de medição).

3. Acelerómetros Piezoresistivos: Diferentes dos acelerómetros Piezoelétricos, estes baseiam-se na propriedade de materiais semicondutores, como o silício, de mudar a sua resistência elétrica quando submetidos a uma força mecânica que provoque a sua deformação. Essa variação da resistência é medida através de uma ponte de *wheatstone* e convertida num sinal de tensão que será a aceleração. O seu funcionamento encontra-se ilustrado na Figura 17.

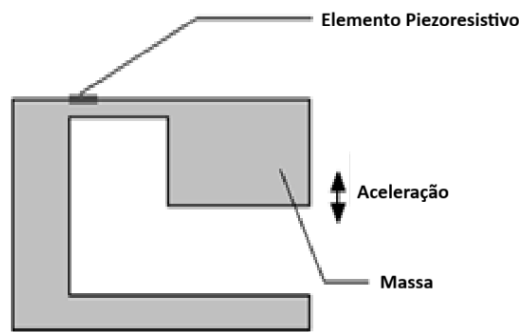


Figura 17 – Ilustração do funcionamento dos acelerômetros do tipo Piezoresistivos [46]

Este tipo de acelerômetro apresenta como vantagens a elevada sensibilidade e banda de leitura, a possibilidade de obter frequências elevadas naturais (>30 KHz), o processamento de dados simplificado e um baixo custo. No entanto, possuem pouca linearidade, elevada sensibilidade a temperatura, quanto maior for a largura da banda menor será a sensibilidade e ainda um desempenho geralmente mediano.

2.5.3. Acelerômetros Triaxiais

Os acelerômetros triaxiais consistem em três sensores de aceleração montados ortogonalmente entre si, permitindo a medição simultânea de vibrações nos três eixos espaciais (X, Y e Z). Esta capacidade representa uma vantagem significativa em relação aos acelerômetros uniaxiais tradicionais, especialmente para aplicações de detecção de falhas em motores de indução.

A análise de vibração triaxial permite o diagnóstico multi-classe de falhas em motores de indução. Esta abordagem multidimensional possibilita a identificação de padrões complexos que poderiam passar despercebidos com acelerômetros unidirecionais, isto é, a análise seria unidimensional. A utilização deste tipo de sensores permite a caracterização do movimento vibratório em todas as direções, facilitando a identificação de falhas que se manifestam predominantemente em direções específicas. Por exemplo, um desalinhamento tipicamente produz vibrações axiais significativas, enquanto um desequilíbrio manifesta-se principalmente no plano radial.

A redução do número de acelerómetros a serem montados é uma vantagem, uma vez que reduz a complexidade da instalação dos mesmos no equipamento a ser medido. Na indústria onde os espaços muitas vezes são reduzidos e têm várias condicionantes, é um fator a ter em conta na hora da decisão de que tipo de acelerómetro utilizar. A garantia de ortogonalidade entre eixos de medição ao utilizar-se um acelerómetro triaxial é fundamental uma vez que elimina os erros associados ao posicionamento individual de múltiplos sensores. A capacidade de análise correlacionada entre eixos permite a implementação de algoritmos que exploram as correlações entre as vibrações nos diferentes planos, aumentando a confiabilidade da monitorização assim como a qualidade do diagnóstico de falha.

Os acelerómetros triaxiais modernos, especialmente aqueles baseados em tecnologia *MEMS*, oferecem excelente relação custo-benefício e podem ser facilmente integrados em sistemas de aquisição de dados distribuídos, permitindo monitorização ininterrupta de múltiplos pontos do motor.

2.5.4. Posicionamento e Instalação

O posicionamento adequado dos acelerómetros é crucial para a eficácia da deteção de falhas em motores de indução. A localização dos sensores pode afetar significativamente a qualidade dos sinais captados e, conseqüentemente, a confiabilidade do diagnóstico [31].

Para uma deteção mais abrangente de falhas em motores de indução, é recomendada a instalação de acelerómetros em pontos específicos que maximizem a captação de sinais relevantes para os diferentes tipos de falhas. A Figura 18 representa o exemplo de localização de um acelerómetro num conjunto motor bomba.

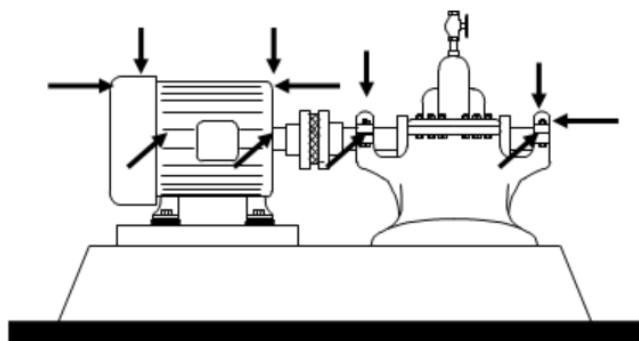


Figura 18 – Localização de acelerômetros num conjunto motor bomba [49]

O local estratégico para a instalação de acelerômetros é fundamental para a detecção eficaz de falhas em motores de indução trifásicos, otimizando a capacidade de monitorização e diagnóstico.

Ao posicionar os acelerômetros nas tampas, tanto no lado do acionamento quanto no lado da ventilação, é possível identificar com precisão uma série de anomalias. Essa localização permite a detecção eficaz de falhas nos próprios rolamentos, desalinhamento, desequilíbrio, excentricidade do rotor e, de forma secundária, a manifestação de barras danificadas.

Adicionalmente, sensores instalados no corpo do estator, preferencialmente próximos às conexões dos enrolamentos, são particularmente eficazes para identificar falhas no estator, problemas de fixação do motor e ressonâncias estruturais que possam comprometer a integridade da máquina.

Quanto à orientação dos eixos de medição nos acelerômetros triaxiais, uma padronização da configuração facilita a interpretação dos dados. Recomenda-se tipicamente que o eixo X seja alinhado com a direção radial horizontal, o eixo Y com a direção radial vertical e o eixo Z com a direção axial. Essa configuração é fundamental para correlacionar os sinais com tipos específicos de falhas, uma vez que o desequilíbrio se manifesta predominantemente nas direções radiais, o desalinhamento angular produz vibrações significativas na direção axial e as falhas em rolamentos geram componentes em todas as direções, com padrões espectrais característicos.

O método de fixação do acelerómetro também desempenha um papel significativo na resposta em frequência do sistema de medição. A montagem com parafuso oferece a melhor resposta em frequência, tipicamente até 20 kHz, mas exige uma modificação permanente no equipamento. A montagem com resina proporciona uma boa resposta em frequência, geralmente até 10 kHz, sem a necessidade de modificações permanentes, embora possa ser afetada por variações de temperatura e pelo envelhecimento do adesivo. A montagem magnética, por sua vez, permite uma instalação rápida e não permanente, mas limita a resposta em frequência a cerca de 5 kHz e pode ser comprometida por superfícies irregulares. Por fim, a montagem com sonda manual possibilita medições pontuais em diversas localizações, mas apresenta uma resposta em frequência mais limitada, tipicamente até 1 kHz e requer a presença constante de um operador.

Para aplicações de detecção de falhas em motores de indução, a recomendação geral é utilizar a montagem com parafuso ou adesivo de alta rigidez. Essas opções garantem uma resposta em frequência adequada para a captação dos sinais vibracionais relevantes, essenciais para um diagnóstico preciso e preditivo.

2.5.5. Sistema de Aquisição de Dados de Vibração

A aquisição de dados é a primeira e mais crítica etapa no *CBM* baseado em vibração, determinando a qualidade e a amplitude da informação disponível para o diagnóstico. Em baixo estão indicadas as etapas para a correta aquisição de dados.

1. Tipos de Sensores: O Acelerómetro

Nas monitorizações de máquinas elétricas são utilizados três tipos de sensores: transdutores de deslocamento (para baixa frequência e grandes amplitudes, tipicamente em veios de máquinas críticas), sensores de velocidade (para gamas de média frequência), e acelerómetros (para o espectro de alta frequência).

O acelerómetro piezoelétrico é o sensor dominante a sua popularidade deve-se a:

- Elevada Gama de Frequências: Capacidade de captar tanto vibrações de baixa frequência (associadas a desequilíbrio e desalinhamento) como as de alta frequência (associadas a falhas incipientes em rolamentos e engrenagens).
- Robustez: Adequado para ambientes industriais severos (poeira, humidade, variações de temperatura).
- Princípio de Funcionamento: Utiliza o efeito piezoelétrico, onde uma massa ligada a um cristal gera uma carga elétrica proporcional à aceleração sentida.

2. Posicionamento Típico do Sensor

O posicionamento do sensor é crucial para garantir que a máxima energia de vibração da falha seja capturada. Regra geral, os sensores são montados nas caixas de rolamentos, pois é onde a vibração se manifesta mais intensamente.

O posicionamento ideal de um sistema motriz (motor e carga) exige a medição em três direções ortogonais:

- Radial (Horizontal e Vertical - Eixos X e Y): Usado para detetar desequilíbrio, desalinhamento e problemas de rolamentos.
- Axial (Eixo Z): Usado para detetar desalinhamento angular, falhas de engrenagens helicoidais e, crucialmente, folgas.

3. A Importância da Monitorização Multiaxial (Triaxial)

O uso de acelerómetros triaxiais, que medem X, Y e Z simultaneamente, é imperativo para o diagnóstico avançado e a justificação para a Transformada de Clarke:

- **Identificação Completa da Falha:** A vibração não se manifesta exclusivamente numa única direção. Por exemplo, uma falha de rolamento pode apresentar o seu pico de energia numa direção radial, enquanto o desalinhamento angular domina no eixo axial. A medição uniaxial corre o risco de mascarar falhas se o sensor não estiver perfeitamente alinhado com a direção dominante da vibração.

- **Localização precisa:** A análise comparativa das amplitudes nos três eixos (X, Y, Z) permite não só detetar a falha, mas também localizá-la e determinar a sua natureza.
- **O Vetor de Aceleração como Entrada:** A monitorização triaxial converte o sinal de vibração num vetor de aceleração espacial (A_x, A_y e A_z). O processamento destes três sinais como um vetor único é o que permite a aplicação de técnicas avançadas de processamento vetorial, como a Transformada de *Clarke*, que visa organizar a informação espacial e temporal da vibração de forma mais eficaz do que a simples análise de cada eixo individualmente.

O sensor triaxial é, portanto, o elemento fundamental que permite a aquisição de dados na estrutura e no formato necessários para a abordagem inovadora proposta nesta dissertação.

2.5.6. O Sinal de Vibração como Vetor Triaxial

A monitorização através de um acelerómetro triaxial não deve ser visto simplesmente como a aquisição de três sinais escalares independentes, mas sim como a medição dos componentes de um único vetor de aceleração que evolui no espaço tridimensional ao longo do tempo. Esta é a premissa fundamental que justifica o processamento avançado de dados de vibração e, crucialmente, a aplicação de transformadas de coordenadas.

Definição e Significado Físico

A cada instante (t), o acelerómetro triaxial fornece um ponto no espaço, definido pelas coordenadas ortogonais de aceleração $A(t)$, dadas pela Equação 3.

$$A(t) = (A_x(t), A_y(t), A_z(t)) \quad (3)$$

O vetor $A(t)$ descreve o movimento exato do ponto de medição e é uma resposta mecânica às forças que atuam no motor, incluindo as Forças Magnéticas Unilaterais (*UMP*) geradas por falhas elétricas.

Magnitude vs. Direção: Enquanto a magnitude do vetor $A(t) = \sqrt{(A_x^2 + A_y^2 + A_z^2)}$ fornece uma medida da energia total da vibração, a direção e a forma da trajetória do vetor $A(t)$ no espaço são os dados mais ricos e discriminatórios para o diagnóstico.

O Vetor Triaxial como precursor para a Análise de Padrões 2D só é aplicável com o reconhecimento da vibração como um vetor espacial. Este é o elo que permite a transposição da metodologia do domínio elétrico para o domínio mecânico, nomeadamente:

- **Codificação Espacial:** A chave para o diagnóstico de falhas através do *Park's Vector Approach (PVA)* na *MCSA* é a capacidade da Transformada de *Clarke* de pegar nos três sinais elétricos desfasados e gerar um padrão bidimensional (o vetor espacial $\alpha\beta$). Este padrão organiza as características de falha em formas geométricas (círculos em motor saudável, elipses ou outras deformações em motor com falha).
- **A Transposição Metodológica:** Para aplicar um raciocínio análogo à vibração, o vetor triaxial (a_x, a_y, a_z) precisa ser sujeito a uma transformação que o projete de forma coerente e significativa num plano 2D. Ao tratar a_x , a_y e a_z como as "fases" de um sistema de aceleração espacial, a aplicação da Transformada de *Clarke* permite codificar o movimento do vetor de vibração em coordenadas $\alpha\beta$.
- **Vantagem no Deep Learning:** Esta transformação converte as três séries temporais do acelerómetro numa imagem de padrão 2D no plano $\alpha\beta$, ideal para o processamento via Redes Neurais Convolucionais (*CNNs*). Este método explora não apenas as características estatísticas dos eixos, mas a estrutura geométrica e angular do movimento de vibração, resultando numa representação visualmente intuitiva e numericamente poderosa das assinaturas de falha.

O vetor triaxial é, portanto, o dado de entrada que confere à presente dissertação a justificação matemática e física para a aplicação da Transformada de Clarke à análise de vibração.

2.6. Técnicas de Processamento e Transmissão de Sinais para Diagnóstico

O processamento eficaz dos sinais de vibração é fundamental para a extração de informação com qualidade, para a execução de diagnósticos relevantes. Esta seção analisa as contribuições recentes em técnicas de processamento de sinais, aplicadas à deteção de falhas em motores de indução.

Num estudo comparativo das diferentes metodologias de análise tempo-frequência, que podem ser utilizadas para deteção de falhas em motores de indução através da análise de sinais de vibração, os autores avaliaram técnicas como a transformada de *Fourier* de curto termo (*STFT*), a transformada *Wavelet* contínua (*CWT*), a transformada *Wavelet* discreta (*DWT*), a transformada *Wavelet packet* (*WPT*) e a decomposição em modos empíricos (*EMD*), concluindo que cada técnica apresentava vantagens específicas dependendo do tipo de falha e das condições operacionais [50].

Nesse mesmo estudo, foi proposta uma técnica inovadora para identificação de falhas em rolamentos de motores de indução empregando análise de gráficos de visibilidade diferencial (DVG) de sinais de vibração. Esta abordagem, baseada na teoria de redes complexas, transformava séries temporais de vibração em representações gráficas cujas propriedades topológicas relacionam-se com as características específicas para diferentes tipos de falhas. Os autores demonstraram que métricas como centralidade, coeficiente de agrupamento e distribuição de graus permitiam discriminação eficaz entre condições normais e diferentes tipos de falhas em rolamentos [51].

Numa abordagem para a identificação de falhas sob várias condições de carga no rotor de um motor de indução, realizando análises no domínio do tempo, frequência e tempo-frequência em dados de vibração, o estudo introduziu uma abordagem de aprendizagem por transferência baseada na imagem do espectro, demonstrando que a representação visual de padrões espectrais, combinada com técnicas de visão computacional, oferecia capacidades superiores de generalização para condições operacionais não vistas durante o estudo [52].

Num trabalho de investigação abrangente de assinaturas de falhas e análise espectral de sinais de vibração em falhas distribuídas em rolamentos, os autores desenvolveram um modelo matemático detalhado para prever as componentes espectrais associadas a diferentes configurações de falhas, validando experimentalmente as previsões teóricas. O trabalho demonstrou que a análise espectral avançada permitia não apenas detetar a presença de falhas, mas também caracterizar a sua distribuição espacial e gravidade [53].

Foi proposta a utilização de redes neurais convulsionais unidimensionais dilatadas para diagnóstico de falhas em motores de indução utilizando sinais de vibração. A arquitetura sugerida incorporava camadas convulsionais com dilatação progressiva, permitindo a captura de padrões em múltiplas escalas temporais sem aumento proporcional da complexidade computacional. Os autores relataram que o desempenho foi superior em comparação com técnicas tradicionais de extração manual de características, seguidas por classificadores convencionais [28].

2.6.1. Processamento de Sinais para Análise de Vibração

A análise de sinais de vibração para diagnóstico de falhas evoluiu a partir de técnicas estatísticas e espectrais que operam nos domínios do tempo e da frequência. Estas técnicas fornecem uma base essencial para a monitorização da condição, mas

apresentam limitações significativas quando confrontadas com ambientes operacionais complexos e falhas em estágio inicial.

2.6.1.1. Análise no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo constitui a abordagem mais direta para o processamento de sinais de vibração, trabalhando diretamente com a amplitude do sinal em função do tempo. Esta técnica é particularmente útil para detecção de eventos transitórios, impactos e padrões temporais característicos em motores de indução trifásica [54].

O método da descrição do domínio do tempo baseia-se na análise das informações da amplitude e fase do sinal de vibração para a detecção de falhas. A análise envolve o acompanhamento das mudanças nos sinais físicos ou de séries de dados temporais em função do tempo, geralmente através de gráficos para valores de amplitude de sinal em função do tempo. Além disso, a amplitude de vibração pode ser representada como sendo a aceleração, velocidade ou posição/deslocamento vibratório da máquina e dos seus componentes.

Os desequilíbrios do rotor, por exemplo, criam componentes harmônicos característicos nas grandezas elétricas, eletromagnéticas e mecânicas. Nesse sentido, tanto as variáveis mecânicas, como vibrações ou oscilações de binário, quanto as variáveis elétricas, como correntes ou potência instantânea, podem ser analisadas para detetar desequilíbrios mecânicos [55],[56].

A forma mais comum de análise no domínio do tempo ocorre por meio de indicadores estatísticos de condição por meio de índices quantitativos. Estes permitem o cálculo de valores quantitativos globais e são fundamentais para o entendimento da distribuição dos dados de vibração. Os principais parâmetros estatísticos utilizados na análise temporal incluem:

- **Valor de pico:** caracterizado pelo maior valor de amplitude no domínio do tempo, que é dado pela Equação 4;

$$X_{pico} = A_{max} \quad (4)$$

- **Root Mean Square (RMS) ou Valor eficaz:** descreve a quantidade de energia do sinal vibratório como um todo e não é sensível ao aumento de picos isolados no sinal. O valor RMS – Equação 5 - é particularmente útil para a monitorização das tendências generalizadas da vibração e deteção do agravamento gradual das falhas. Pode ser representado pela equação:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X^2} \quad (5)$$

- **Fator de Crista (Crest Factor – CF):** é a razão entre o valor de pico a pico e o valor de RMS. Define-se como a razão entre o valor de pico e o valor RMS, e calcula-se através da Equação 6. É um indicador sensível a impactos instantâneos, sendo particularmente útil para deteção precoce de falhas em rolamentos, que tipicamente manifestam-se como impactos de curta duração, a expressão é a seguinte:

$$CF = \frac{X_{pico}}{X_{RMS}} \quad (6)$$

- **Pico a Pico:** corresponde à soma do pico máximo com o valor absoluto do pico mínimo do sinal, esse valor é particularmente eficaz na identificação de picos isolados de alta amplitude. Na Figura 19 é possível verificar valores de medida de vibração, para um sinal complexo.

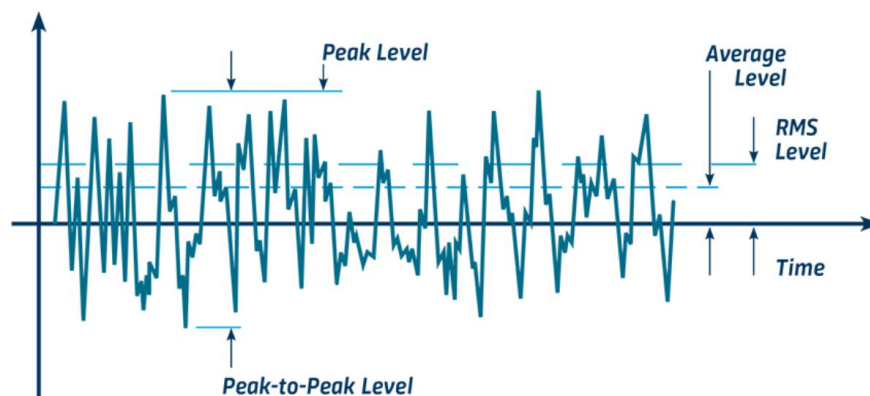


Figura 19 – Valores de medida de vibração para um sinal complexo [57]

Os métodos estatísticos mais comuns para a análise no domínio do tempo são os seguintes:

- **Função densidade de probabilidade (F.D.P):** é a probabilidade de encontrar valores instantâneos num determinado intervalo de amplitudes, dividido pelo tamanho do intervalo. A forma da curva de densidade de probabilidade pode ser representada por uma série de índices numéricos, que são análogos ao momento mecânico com relação ao centróide do plano.
- **Curtose:** representa o quarto momento estatístico normalizado da distribuição de amplitudes. Na prática, esta descreve a distribuição dos picos no espectro. A sua expressão é dada pela Equação 7:

$$K = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - \mu)^4}{N\sigma^4} \quad (7)$$

Onde, $x(n)$ é o vetor de dados do sinal lido, N é o total de amostras, μ é a média e σ é o desvio padrão.

Múltiplas características como média, variância, *RMS*, desvio padrão, fator pico a pico e *curtose* podem ser extraídas dos dados brutos. Esses valores são estimados segmentando os dados completos de vibração a cada segundo. A análise no domínio do tempo é particularmente valiosa quando combinada com técnicas de *machine learning*, que podem identificar padrões subtis nos parâmetros estatísticos indicativos de falhas específicas [52].

Limitações: As características de tempo, como *RMS* e *Kurtosis*, são vulneráveis a alterações na velocidade de rotação e na carga do motor. Em estágios avançados de falha, o sinal pode tornar-se mais aleatório e suave, resultando numa redução inesperada da *Kurtosis*, o que pode levar a um falso negativo. Além disso, não fornecem informação sobre a frequência específica da falha.

2.6.1.2. Análise no Domínio da Frequência

A análise no domínio da frequência constitui uma das técnicas amplamente utilizadas, para processamento de sinais de vibração em motores de indução. Esta abordagem baseia-se na decomposição do sinal nas suas componentes de frequência, permitindo a identificação de padrões espectrais característicos associados a falhas específicas. Este tipo de análise fornece informações sobre a condição de funcionamento do equipamento em análise, visto que cada elemento rotativo produz uma frequência característica.

A fundamentação matemática desta técnica é a Transformada de *Fourier*, que decompõe qualquer sinal periódico na soma de sinais sinusoidais com diferentes frequências, amplitudes e fases. A sua expressão matemática é dada pela Equação 8:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (8)$$

Onde $f(t)$ - é a função no domínio do tempo, $F(\omega)$ - é a função no domínio da frequência e finalmente $e^{-j\omega t}$ - que pela fórmula de Euler é igual a $\cos \omega t - j \sin \omega t$ é a fórmula de onda sinusoidal complexa com frequência ω . Quando é calculada a Transformada de Fourier está a ser iniciado um processo de decomposição utilizando $e^{-j\omega t}$ para filtrar e quantificar a presença da frequência ω no sinal $f(t)$. Assim o valor de $F(\omega)$ revela a quantidade específica daquela frequência no sinal.

As principais vantagens da análise no domínio da frequência incluem:

- Identificação de componentes periódicas: permite isolar e quantificar componentes de frequência específicas associadas a diferentes tipos de falhas, mesmo quando estas componentes têm amplitudes relativamente baixas no sinal original.

- Separação de fontes de vibração: diferentes mecanismos de falha tipicamente manifestam-se em faixas de frequência distintas, facilitando a sua identificação e classificação.
- Existência de documentação com as frequências características associadas a diferentes tipos de falhas em motores de indução, facilitando a interpretação dos resultados.

Em contrapartida, aponta como limitações críticas (Sinais Não Estacionários): O pressuposto fundamental da FFT é que o sinal a ser analisado é estacionário (as suas propriedades estatísticas não mudam ao longo do tempo). Contudo, muitos sinais de vibração em motores, especialmente sob flutuação de carga ou durante o *startup/shutdown*, são não estacionários.

- Em sinais não estacionários, a FFT não consegue localizar os eventos no tempo, misturando as componentes de frequência e resultando em espectros "espalhados" ou pouco claros.
- Este problema é particularmente agudo no CBM moderno, onde os motores frequentemente operam com Variadores de Frequência (VFDs), cuja velocidade e carga podem variar constantemente, inviabilizando a análise FFT tradicional.

A *Transformada Rápida de Fourier* (FFT) converte o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo identificar as componentes harmônicas e as frequências características associadas a tipos específicos de falha (exemplo: frequências de rolamento, desalinhamento, ou falhas elétricas).

As limitações das técnicas tradicionais, em particular a dificuldade da FFT em lidar com sinal não estacionário e a sensibilidade das características de tempo ao ruído complexo, impulsionaram a pesquisa para métodos mais sofisticados:

1. Tempo-Frequência (Wavelets): Para superar as deficiências da FFT, surgiram transformadas que oferecem resolução simultânea no tempo e na frequência, o que é essencial para decompor a informação de sinais complexos [58].

2. Figuras de duas dimensões e *Deep Learning*: Mais recentemente, a necessidade de representações robustas para classificadores avançados (CNNs) levou à criação de formatos 2D, como as imagens. Justificando a procura de uma transformada, exemplo a Transformada de *Clarke*, que organize a informação espacial e temporal dos três eixos de forma intrinsecamente mais estável do que as técnicas convencionais [59].

Para análise de falhas em motores de indução, as principais frequências são:

- Frequência de rotação (f_r): corresponde à velocidade de rotação do eixo, tipicamente manifestando-se como 1X (componente fundamental) no espectro. Amplitudes elevadas nesta frequência podem indicar desequilíbrio.
- Harmônicos da frequência de rotação: Componentes em 2, 3 ou mais vezes a fundamental, podem indicar desalinhamento, folgas mecânicas ou excentricidade.
- Frequência de passagem de polos (f_p): relacionada ao número de polos do motor e à frequência de alimentação, manifestações anómalas nesta frequência podem indicar problemas no circuito magnético.
- Frequências de falha em rolamentos: incluem frequências características de falhas na pista externa (BPFO), pista interna (BPFI), elementos rolantes (BSF) e gaiola (FTF).
- Frequências de barras partidas: manifestam-se como bandas laterais em torno da frequência de alimentação, espaçadas pela frequência de escorregamento.

A análise espectral de sinais de vibração permite identificar com alguma precisão a presença de falhas, como também a sua localização específica e, em muitos casos, o seu estado de evolução [60].

2.6.2. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A Transformada Rápida de *Fourier* é o nome dado ao algoritmo utilizado pelos equipamentos para o cálculo da Transformada Discreta de *Fourier* (DFT) e também

da sua inversa (IDFT). Esta eficiência permitiu a implementação de análise espectral em tempo real, fundamental para os sistemas de monitorização contínua. A análise de *Fourier* converte um sinal do seu domínio original para uma representação no domínio da frequência e a sua inversa converte o sinal no domínio da frequência para seu domínio original, conforme as equações 9 e 10, respetivamente:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (9)$$

E

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (10)$$

Onde, x_n representa o sinal no domínio do tempo, X_k representa o espectro de frequência, N ao número de amostras, n é o índice de tempo, k índice da frequência e, por último, $e^{j\frac{2\pi kn}{N}}$ é o termo de correlação que mede a presença de cada frequência no sinal x_n .

A FFT representa uma ferramenta fundamental para análise de vibração, mas apresenta limitações importantes quando aplicada a sinais não estacionários ou transitórios, cenários onde técnicas de análise tempo-frequência oferecem vantagens significativas [61].

2.6.3. Transformada de *Wavelet*

A Transformada de *Wavelet* representa uma técnica avançada de processamento de sinais que supera algumas limitações fundamentais da FFT, particularmente para análise de sinais não estacionários ou com características transitórias. Enquanto a FFT decompõe o sinal em funções sinusoidais de duração infinita, a Transformada de *Wavelet* utiliza funções localizadas tanto no tempo quanto na frequência, que permitem uma análise com resolução variável. A Transformada de *Wavelet* é particularmente eficaz para deteção de falhas em rolamentos, que tipicamente manifestam-se como impactos de curta duração seguidos de resposta oscilatória amortecida [52].

A Transformada de *Wavelet* representa uma ferramenta poderosa e versátil para a análise de sinais de vibração, oferecendo vantagens significativas em comparação com métodos tradicionais. As suas principais qualidades incluem:

- **Análise Multi-resolução:** uma das características mais notáveis da Transformada de *Wavelet* é a sua capacidade de examinar o sinal simultaneamente em diversas escalas temporais e de frequências. Essa adaptabilidade permite uma análise detalhada, ajustando-se dinamicamente às características intrínsecas do sinal.
- **Localização Temporal de Eventos:** diferente de outras transformadas, a de *Wavelet* não apenas identifica a presença de componentes de frequência específicas, mas também a sua exata localização no tempo. Essa capacidade é crucial para a análise de eventos transitórios, como impactos em rolamentos, onde a precisão temporal é fundamental.
- **Redução de Ruído:** a Transformada de *Wavelet* oferece capacidades avançadas de filtragem, permitindo uma separação eficiente entre o sinal de interesse e o ruído presente, que resulta numa análise mais limpa e precisa.

Para aplicações de detecção de falhas em motores de indução, duas variantes da Transformada de *Wavelet* são predominantemente utilizadas:

- **Transformada *Wavelet* Contínua:** esta variante proporciona uma representação altamente redundante do sinal de que resulta numa excelente resolução visual que é ideal para análises qualitativas aprofundadas. Contudo, o seu elevado custo computacional restringe a sua aplicação em cenários de tempo real.
- **Transformada *Wavelet* Discreta:** a DWT destaca-se pela implementação computacionalmente mais eficiente, baseada em bancos de filtros digitais. Essa característica torna-a particularmente adequada para aplicações em tempo real e para a extração de características essenciais que alimentam algoritmos de classificação de falhas [62] ,[63].

2.6.4. Vetor de *Park*

As limitações das análises tradicionais, em lidar com um sinal não estacionário e a necessidade de codificar a informação espacial dos sistemas trifásicos levaram ao desenvolvimento de transformadas de coordenadas. Estas transformadas convertem múltiplos sinais acoplados (como as correntes de fase) em eixos ortogonais, simplificando a análise e revelando padrões de falha robustos [64].

A Transformada de Clarke é o método fundamental para projetar um sistema de três fases (a, b, c) num sistema de coordenadas ortogonais bidimensional (α , β), num referencial estacionário. Para um sistema de corrente (i_a , i_b , i_c), a Transformada de *Clarke* resulta no Vetor Espacial de Corrente (Space Vector Analysis - SVA) [65],[66].

A matriz de transformação bidimensional mais comum é dada pela Equação 11:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

Este método é amplamente adotado no diagnóstico de motores de indução devido à sua:

- **Codificação Geométrica Incomparável:** Num motor sem falha, as correntes trifásicas equilibradas resultam num vetor espacial de corrente com tamanho constante que traça um padrão perfeitamente circular no plano $\alpha\beta$.
- **Assinaturas Visuais de Falha:** A presença de falhas elétricas, como o curto-circuito entre espiras (ITSC) ou a quebra de barras do rotor (BRB), distorce a simetria da corrente, resultando numa alteração imediata da forma do padrão. O círculo é deformado em padrões elípticos ou mais complexos, cuja orientação e excentricidade fornecem uma assinatura de falha robusta e visualmente intuitiva.

O *Park's Vector Approach* (PVA), que utiliza o vetor de corrente no plano $\alpha\beta$, é reconhecido como um dos métodos eficazes para o diagnóstico de falhas de estator (ITSC) e de rotor (BRB). As suas características são as seguintes [67],[68]:

- **Robustez e Simplicidade:** A representação bidimensional concentra as características de falha de forma compacta e significativa. A *Clarke-Park Transformation* tem a capacidade de organizar a informação de falha de modo que a distinção entre a condição sem falha e a condição de falha seja de simples interpretação.
- **Integração com *Redes Neurais Convolucionais* (CNNs):** A eficácia do PVA é sublinhada pela sua utilização como o método ideal para pré-processar sinais de corrente em imagens 2D, que servem como entrada de alta qualidade para as Redes Neurais Convolucionais (CNNs). Estas imagens capturam a assinatura geométrica do vetor espacial, resultando em alta precisão na classificação de falhas. O método permite que a CNN extraia características espaciais diretamente do padrão vetorial, algo que a análise FFT não consegue [69].

O sucesso da *Clarke-Park Transformation* é baseado na conversão de três sinais num padrão 2D e estabelece o precedente para a abordagem deste trabalho. O sinal de vibração triaxial (a_x, a_y, a_z) constitui um vetor análogo, espacialmente distribuído e afetado pelas *Unbalanced Magnetic Pull*.

O objetivo deste trabalho é, portanto, transpor a comprovada eficácia da codificação vetorial da CPT, aplicando-a ao sinal mecânico para:

- Obter uma representação fisicamente significativa do vetor de vibração;
- Gerar um padrão 2D (vetor de vibração espacial) tão robusto e descritivo quanto o vetor de corrente para a deteção de falhas eletromagnéticas no domínio da vibração.

2.6.5. Técnicas avançadas de Processamento

Além das técnicas tradicionais de análise no domínio do tempo e frequência, diversas abordagens avançadas têm sido desenvolvidas e aplicadas com sucesso na detecção de falhas em motores de indução. Entre as mais estudadas, destacam-se:

- **Decomposição em Modos Empíricos (EMD):** técnica adaptativa que decompõe o sinal em funções de modo intrínseco (IMF), particularmente eficaz para análise de sinais não lineares e não estacionários. A EMD oferece vantagens significativas para isolamento de componentes relevantes em sinais de vibração complexos [70].
- **Análise de Envelope de Ordem Superior:** extensão da análise de envelope tradicional, incorporando estatísticas de ordem superior para uma melhor detecção de não linearidades características de falhas que estão numa fase inicial [71].
- **Gráficos de Visibilidade Diferencial (DVG):** esta técnica transforma séries temporais em redes complexas, permitindo a aplicação de métricas da teoria de *grafos* para caracterização de sinais de vibração e identificação de padrões anómalos [51].
- **Redes Neurais Convulsionais (CNN):** as CNN unidimensionais dilatadas demonstram "notável eficácia na extração automática de características relevantes diretamente dos sinais vibratórios brutos", superando a necessidade de extração manual de características e alcançando taxas de acerto superiores a 99% na identificação de falhas específicas [28].

A integração destas técnicas avançadas com abordagens tradicionais de processamento de sinais representa uma tendência promissora para o desenvolvimento de sistemas de detecção de falhas cada vez mais sensíveis, específicos e robustos a variações operacionais.

2.6.6. Conversão de Sinais para Imagens 2D

A rápida evolução do *Deep Learning* (DL) e, em particular, o sucesso das Redes Neurais Convolucionais (CNNs) em tarefas de Visão Computacional, revolucionou o diagnóstico de falhas em máquinas elétricas. O paradigma de diagnóstico migrou de um processo baseado em características estatísticas extraídas manualmente para a ingestão de representações de sinal que se assemelham a imagens.

O sinal de vibração bruto (uma direção) ou os espectros de frequência são menos eficientes como entrada para CNNs, que são inerentemente otimizadas para processar dados espaciais (duas dimensões). A conversão dos sinais para o formato de imagem permite:

- Aproveitar a Capacidade da CNN: As CNNs são excelentes na extração automática de características locais, como bordas, texturas e padrões, que correspondem a regimes específicos de frequência e tempo no sinal de vibração.
- Organização de Informação: A representação 2D concentra a informação de falha numa matriz compacta, tornando-a mais discriminatória e menos sensível a variações de ruído do que as séries temporais brutas[72].

Na literatura são apresentas várias abordagens para conversão os dados de vibração (uma direção ou multiaxiais) em formatos 2D para classificação via CNNs:

- Mapas de Tempo-Frequência: A aplicação de transformadas como a Transformada *Wavelet* (CWT ou DWT) ou a Transformada de *Fourier* de Curto Tempo (STFT) converte o sinal 1D em um espectrograma bidimensional. Este mapa revela como a energia do sinal (e, portanto, as frequências de falha) se distribui no tempo, sendo frequentemente tratado como uma imagem *Grayscale* para a CNN.
- Imagens de *Grayscale* e RGB: Os sinais podem ser convertidos em imagens através da codificação de amplitude. Numa abordagem multiaxial (X, Y, Z), a vibração pode ser transformada num Formato RGB (Red, Green, Blue), onde

cada canal (R, G, B) codifica a informação de um eixo diferente (X, Y, Z) ou de domínios diferentes (tempo, frequência, etc.).

- Geração de Imagem Baseada em Padrões: Embora menos comum na vibração tradicional, métodos como a Recorrência de Gráficos ou a Transformada de *Markov* criam imagens que capturam padrões de fase ou de mudança de estado do sistema.

A eficácia destas abordagens reforça a validade de usar a análise de padrões 2D no diagnóstico quando à vibração. No entanto, a maioria das técnicas mencionadas (espectrogramas ou codificação RGB simples) não tem uma base vetorial ou física que organize o vetor de vibração (a_x , a_y e a_z) de forma otimizada:

- A codificação RGB (X, Y, Z) trata os eixos como canais de cor não relacionados, falhando em considerar a sua interdependência vetorial.
- A Transformada de *Clarke* ($\alpha\beta$), comprovada no domínio elétrico, oferece a solução: a sua aplicação ao vetor de vibração multiaxial fornece uma transformação de coordenadas que garante que o padrão 2D gerado (o vetor de vibração espacial) é organizado de uma forma fisicamente significativa, maximizando o poder de extração de características das CNNs[72].

2.7. Sistemas de Manutenção Preditiva Baseados em Vibração

A integração de técnicas de análise de vibração em sistemas abrangentes de manutenção preditiva representa uma tendência significativa na indústria moderna. Esta seção analisa as contribuições recentes nesta área de aplicação.

Neste estudo foi apresentado uma revisão sobre a monitorização de condição de motores de indução, destacando que "a monitorização de condição de motores elétricos é uma tecnologia em crescimento para deteção de falhas em motores de indução, detetando falhas inesperadas antes de sua ocorrência". Os autores discutiram a evolução dos sistemas de manutenção, desde abordagens puramente

corretivas até paradigmas preditivos baseados em condição real, e o papel fundamental da análise de vibração nesta transição [23].

Nesta abordagem, foi desenvolvido um sistema de monitorização de vibração com capacidade de operação em dois modos: modo de medição e modo de sensor sem fios. O sistema integrava acelerómetros *MEMS* e processamento local de sinais e comunicação sem fios, permitindo implementação flexível em diferentes cenários industriais. Os autores demonstraram a viabilidade de sistemas de baixo custo para a monitorização contínua de motores de indução em aplicações industriais reais [73].

No trabalho foi proposta a utilização de redes neurais *MLP* equipadas com doze parâmetros de entrada reais para a identificação e classificação de falhas em estado inicial em motores de indução. O sistema integrava análise de vibração com outros parâmetros operacionais, demonstrando que a abordagem multi-parâmetro oferecia maior robustez e capacidade de diagnóstico em comparação com técnicas baseadas em fontes únicas de informação [74].

Na investigação foi desenvolvida uma abordagem não tradicional para deteção de falhas mecânicas em motores de indução, explorando a possibilidade de extensão da análise de corrente do estator para diagnóstico de vibrações. Os autores demonstraram correlações significativas entre padrões específicos na corrente do estator e características vibratórias associadas a diferentes tipos de falhas mecânicas, sugerindo possibilidades de implementação de sistemas integrados de diagnóstico [75].

2.7.1. Diagnóstico Híbrido e as suas Vantagens

A complexidade e a interconexão das falhas em sistemas motrizes (onde uma falha elétrica pode causar uma falha mecânica, e vice-versa) exigem uma arquitetura de diagnóstico que transcenda a limitação de uma única tecnologia. A tendência futura do CBM aponta inequivocamente para o Diagnóstico Híbrido ou de Fusão de Dados.

O Diagnóstico Híbrido é uma abordagem avançada na manutenção preditiva que combina múltiplas técnicas de análise e/ou múltiplas fontes de dados para diagnosticar falhas em equipamentos (como motores) de forma mais precisa, robusta e confiável do que métodos isolados.

A principal vantagem de um diagnóstico híbrido, que combina a Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA) e a Análise de Vibração, reside na sua cobertura abrangente de falhas.

- **MCSA (Foco Elétrico):** Excelente para a detecção precoce de falhas de estator (ITSC) e rotor (BRB), pois mede diretamente a modulação do campo magnético, que é a causa primária destas falhas.
- **Vibração (Foco Mecânico):** Essencial para o diagnóstico de falhas em rolamentos, desalinhamento e desequilíbrio.
- **Diagnóstico Híbrido:** A obtenção de características nas duas grandezas elétrica e mecânica permite um diagnóstico de falhas onde a assinatura é ambígua ou fraca numa única fonte, garantindo uma “visão” completa do motor elétrico. Por exemplo, a MCSA pode confirmar um BRB, enquanto a vibração mede o impacto mecânico da Força Magnética Unilateral (UMP) resultante.

Um fator crucial que reforça o papel da vibração nos sistemas híbridos é a sua robustez sob condições de operação não ideais.

- **Flutuação de Carga e Velocidade:** A MCSA é altamente eficaz, mas a clareza das suas frequências laterais pode ser significativamente comprometida em motores que operam sob velocidade ou carga variável. Nesses cenários, as frequências de falha podem ser difíceis de rastrear no espectro.
- **Vibração Consistente:** O sinal de vibração, embora também afetado, pode manter características de falha mais consistentes ou ser mais facilmente rastreado por transformadas de tempo-frequência, tornando-o um indicador de falha mais fiável em ambientes dinâmicos.
- **Integração no Diagnóstico Avançado:** A robustez e a universalidade do sinal de vibração justificam o investimento em novos métodos de processamento,

como a abordagem 2D/vetorial, que visam aumentar a sua sensibilidade às falhas elétricas, reduzindo a dependência total de um único sinal.

O futuro do diagnóstico reside em plataformas de *Deep Learning* que podem extrair e fundir as características automaticamente de múltiplos sinais diferentes (corrente e vibração). Este diagnóstico híbrido, complementado pela robustez da vibração em ambientes variáveis e pela precisão da MCSA em condições estáveis, é o caminho para sistemas CBM de elevada fiabilidade e baixa taxa de falsos alarmes.

Capítulo 3: Método de detecção proposto

3.1. Abordagem Proposta

Este trabalho propõe uma metodologia abrangente para detecção e classificação de falhas em motores de indução trifásicos, baseada na análise de vibrações, utilizando acelerómetros triaxiais, nomeadamente falhas no rotor e estator. A abordagem proposta integra aspetos de instrumentação, aquisição de dados, processamento de sinais e classificação de padrões com um resultado coerente e padronizado.

A metodologia proposta tem como base cinco princípios fundamentais:

1. Permite a monitorização não invasiva, sem interferência na operação normal do motor ou necessidade de modificações estruturais significativas;
2. O sistema deve ser capaz de detetar e identificar diversos tipos de falhas (mecânicas e elétricas) utilizando uma configuração unificada do acelerómetro;
3. A metodologia deve considerar aspetos práticos de implementação em ambientes industriais reais, incluindo custo, complexidade e requisitos de manutenção.

A Figura 20 apresenta um diagrama da abordagem proposta, ilustrando os principais componentes e fluxo de dados do sistema de detecção de falhas.

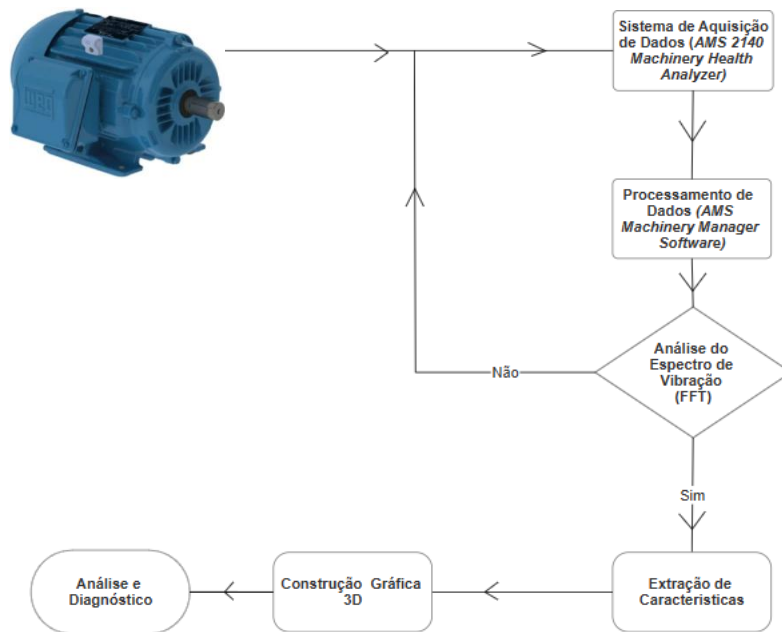


Figura 20 - Diagrama da abordagem proposta

O método de deteção proposto pode ser dividido em quatro etapas principais, são elas:

1. **Instrumentação:** seleção e instalação de um acelerómetro triaxial numa posição estratégica do motor, otimizando assim a deteção de falhas no rotor estator para várias condições simuladas;
2. **Aquisição de dados:** Aquisição de sinais de vibração em diferentes condições operacionais, incluindo variações de carga;
3. **Processamento de dados:** A preparação dos dados começa com a segmentação, que corta o sinal medido em pequenos pedaços de tamanho igual. De seguida o sinal é filtrado e preparado para ser enviado para análises complexas, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT).
4. **Análise:** Identificação e classificação de falhas com base nas características extraídas.

3.2. Equipamentos e Materiais

3.2.1. Especificações dos Motores de Indução


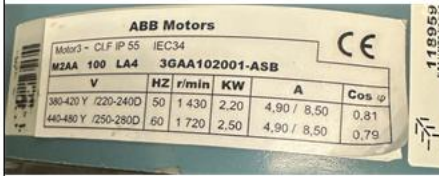
Os motores de indução têm algumas características que se devem ter em atenção aquando da sua escolha para determinada função. As principais características são as seguintes:

- **Potência Útil:** É a potência mecânica que o motor pode fornecer continuamente no seu eixo, operando em condições nominais (tensão e frequência).
- **Tensão de Alimentação:** É a tensão elétrica de linha sob a qual o motor deve operar para atingir sua potência e velocidade nominais.
- **Frequência da Rede:** É a frequência da corrente alternada para a qual o motor é projetado - na Europa a frequência é standard, Hz.
- **Velocidade de Rotação:** É a velocidade de rotação do eixo sob carga nominal e frequência de 50 Hz. A velocidade síncrona, para um motor de 4 polos a 50 Hz é de 1500 rpm. A diferença que existe tem o nome de escorregamento do motor, típico de motores de indução.
- **Número de Polos:** Define a velocidade síncrona do campo magnético girante.
- **Corrente Nominal:** É a corrente elétrica que o motor irá consumir quando estiver a fornecer a sua potência nominal (potência útil).
- **Fator de Potência ($\cos \varphi$):** É a relação entre a potência ativa e a potência aparente. Quanto mais próximo de 1, mais eficiente é o uso da energia elétrica.
- **Classe de Isolamento:** Define a temperatura máxima que o material de isolamento do enrolamento pode suportar de forma contínua. A classe de isolamento está entre a letra A e a letra H, sendo esta última a mais resistente, ou seja, tem tolerância a um valor de temperatura mais elevado.

- Grau de Proteção (IP): Indica o nível de proteção da carcaça contra a intrusão de sólidos e líquidos. O primeiro número apresenta a resistência aos sólidos e o segundo apresenta a resistência aos líquidos.

Para este trabalho foram utilizados dois motores de indução, um da marca WEG (motor A) e outro da ABB (motor B). A Tabela 6 apresenta as especificações técnicas dos motores utilizados nos ensaios.

Tabela 6 - Especificações técnicas dos motores de indução utilizados

Parâmetros	Motor A	Motor B
Potência nominal	4,0 kW	2,2 kW
Tensão nominal	400 V	400 V
Frequência nominal	50 Hz	50 Hz
Velocidade nominal	1430 rpm	1430 rpm
Número de polos	4	4
Corrente nominal	7,62 A	4,9 A
Fator de Potência $\cos \phi$	0,87	0,81
Classe de isolamento	F	F
Grau de proteção	IP55	IP55
Tipo de rotor	Gaiola de esquilo	Gaiola de esquilo
Fabricante	WEG	ABB
Imagem		

Os dois motores, A e B, foram utilizados tendo em vista a simulação de falhas distintas. O motor A foi utilizado para a simulação da falha do rotor (barras partidas) e também para simular a falha de curto-circuito entre espiras. O motor B foi utilizado para a falha de excentricidade, esta falha foi simulada por um desequilíbrio de carga, ou seja, o centro geométrico não coincide com o seu centro de rotação. A Figura 21 representa um dos ensaios de excentricidade realizados. Nesta imagem podemos observar o motor B acoplado a um motor de corrente contínua que funciona como gerador e o acessório utilizado para provocar o desequilíbrio de carga.

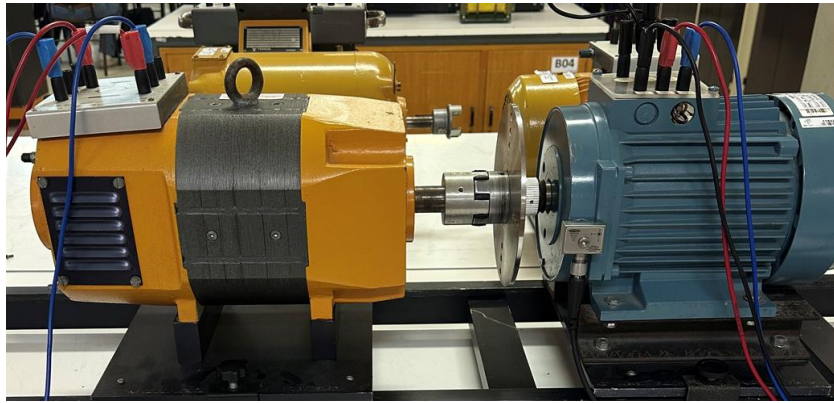


Figura 21 – Fotografia de um dos ensaios de excentricidade no motor B

3.2.2. Acelerómetros Triaxiais Utilizados

Na seleção dos acelerómetros considerou-se aspetos como faixa de frequência, sensibilidade e faixa dinâmica. Após análise comparativa de diferentes opções disponíveis no mercado foi selecionado um acelerómetro triaxial TREA330 que utiliza a tecnologia efeito piezoelétrico, com as características apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 -- Especificações técnicas do acelerómetro triaxial aplicado


Parâmetros	Acelerómetro Triaxial
Sensibilidade	100mV/g (+/-5%)
Gama de Frequências	0,5 - 15000Hz (+/-3dB)
Gama Dinâmica	+/- 80g pico
Montagem	1/4"
Ligação	Conector 4 Pin
Fabricante/Modelo	CTC/TREA330
Imagem	

O acelerómetro escolhido oferece um excelente compromisso entre desempenho, dimensão e custo, sendo adequado tanto para aplicações laboratoriais quanto para implementações industriais. A capacidade de medição simultânea nos três eixos ortogonais (X, Y e Z) permite caracterização completa do comportamento vibratório do motor, aspeto fundamental para a metodologia proposta.

3.2.3. Sistema de Aquisição de Dados

Para aquisição dos sinais de vibração, foi usado um sistema de aquisição de dados industrial, o AMS 2140 da EMERSON, com as características apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Especificações do sistema de aquisição de dados

Parâmetros	AMS 2140 Machinery Health Analyzer
Nº de canais	4
Resolução	24 Bits
Taxa de Amostragem	1000 Hz
Faixa Dinâmica	120 dB
Filtro	Configurável
Armazenamento	32 GB (cartão)
Interface	USB 2.0
Software	AMS Machinery Manager
Imagem	

O sistema escolhido para aquisição de dados recolhidos pelo acelerómetro tem uma elevada resolução e baixo ruído, aspetos críticos para deteção de falhas ainda em fase inicial. A presença de filtros configuráveis e alta taxa de amostragem garantem a aquisição precisa de componentes de alta frequência, foram também

determinantes na sua seleção, e particularmente relevantes para diagnóstico de falhas com base na utilização de sinais de vibração.

3.2.4. Bancada de Testes

Para realização dos diversos ensaios experimentais em condições controladas, foi usada uma bancada de testes dedicada, conforme indica a Figura 22.

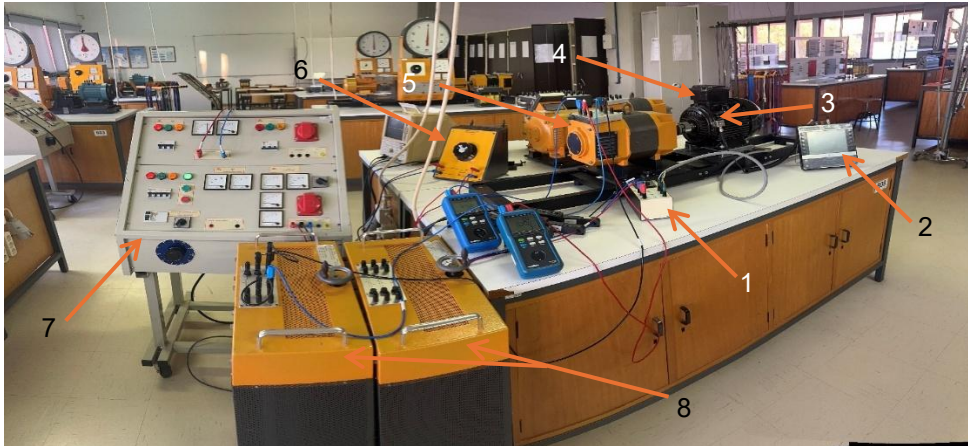


Figura 22 - Fotografia da bancada de ensaios, montada para a realização dos mesmos, de forma controlada

A bancada de testes inclui os seguintes componentes principais, numeradas na Figura anterior:

- 1. Interruptor:** Ligado em serie com o motor em teste, para corte de alimentação;
- 2. Sistema de aquisição de dados:** Para aquisição sincronizada de todos os sinais, AMS 2140;
- 3. Instrumentação:** Acelerómetro Triaxial TREA330;
- 4. Motor de indução trifásico usado nos testes:** Montado em base rígida com isolamento de vibrações externas;
- 5. Motor Corrente Contínua:** O motor CC MV1006 em funcionamento como gerador com excitação independente, usado como carga;
- 6. Sistema de Excitação:** Reóstato MV1905 440 Ω , para controlo da corrente de excitação gerador de CC;
- 7. Fonte de Alimentação:** Fonte de alimentação trifásica variável para o motor sob ensaio.

8. Sistema de carga: Reóstato MV1905 440Ω, para dissipação da energia do gerador.

A bancada permite simulação a realização diversos ensaios da máquina de indução trifásica, com e sem carga, e diferentes tipos de falhas e de severidade ajustável, aspectos fundamentais para validação da metodologia proposta.

3.3. Procedimentos Experimentais

3.3.1. Indução Controlada de Falhas

Para a realização dos ensaios e a aquisição de dados, a metodologia de estudo baseou-se na análise de um conjunto de três motores de indução trifásicos. Especificamente, foram utilizados dois motores A (com as mesmas especificações na chapa de características) e um motor B, este diferente dos anteriores.

Os dois motores A foram dedicados à simulação de falhas internas: um deles foi utilizado para as falhas no estator (curto-circuitos entre espiras), e o outro foi utilizado para a falha de rotor (barras quebradas). Já o motor B foi selecionado para o estudo da falha de excentricidade, sendo esta simulada de forma controlada através da introdução de um desequilíbrio de carga no sistema.

A necessidade da utilização do motor B no plano de ensaios surgiu de uma limitação inesperada. Originalmente, estava previsto a utilização somente dos dois motores A para ensaios de falhas de estator, falhas de rotor, e excentricidade (desequilíbrio).

Contudo, durante a realização dos ensaios, verificou-se o surgimento efetivo de um curto-circuito entre espiras no motor A que estava preparado para o estudo de falhas de estator. Este evento limitou a existência de um motor de referência em

condições sem falha, uma vez que o outro Motor A disponível já estava intencionalmente modificado com a falha de barras do rotor partidas.

Assim, o motor B foi introduzido no plano experimental para preencher a lacuna na investigação da falha de excentricidade, que, como mencionado anteriormente, foi simulada por um desequilíbrio de carga. Desta forma, foi possível cobrir o espectro de falhas inicialmente planeado, apesar da avaria não programada no motor A.

Para validação da metodologia proposta, foram induzidas falhas controladas nos motores de teste, abrangendo as três categorias: falhas no rotor, falhas no estator e excentricidade, através de desequilíbrio de carga.

Para obter essas falhas, foram realizadas modificações físicas nas máquinas, nomeadamente, barras quebradas no rotor e curto-circuitos nas espiras dos enrolamentos de estator.

No caso da avaria por barras partidas – representada na Figura 23, a simulação foi executada através da perfuração controlada da gaiola rotórica. Neste caso em específico, foram realizados furos em duas barras de alumínio do rotor. Esta técnica induziu a fratura precisamente nessas barras, estabelecendo uma severidade de falha conhecida e quantificável, essencial para calibrar e validar as assinaturas de vibração obtidas.



Figura 23 - Modificação física efetuado rotor por forma a obter a avaria designada por barras partidas

Já no ensaio da simulação da falha designada curto-circuito entre espiras, a modificação apresentada tem maior complexidade. Nesta alteração foi necessário ter uma rebobinagem do estator do motor de indução que foi utilizado nos ensaios, de forma que existisse a possibilidade de fazer um shunt, de diferentes quantidades de espiras da mesma bobina. As características da bobinagem estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características da bobinagem

Características	Bobinagem
Nº de Cavas	36
Nº de Grupos por Fase	2
Bobinas por Grupo	3
Espiras por Bobina	58
Nº de Condutores por Bobina	2-(0.71+0.75)
Passo Polar	8-10-12
Tipo de Bobina	Concêntricas
Tipo de Ligação	Paralelo

Para melhor compreensão, na Figura 24 pode-se visualizar o esquema de bobinagem em linha e círculo, do motor A utilizado na simulação da falha. Na Figura 25 é visualizado o esquema de bobinagem das três fases do motor.

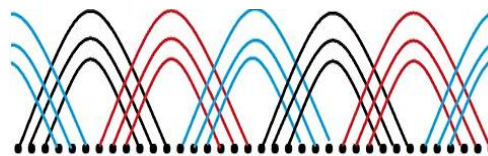


Figura 24 – Representação do passo polar 8-10-12

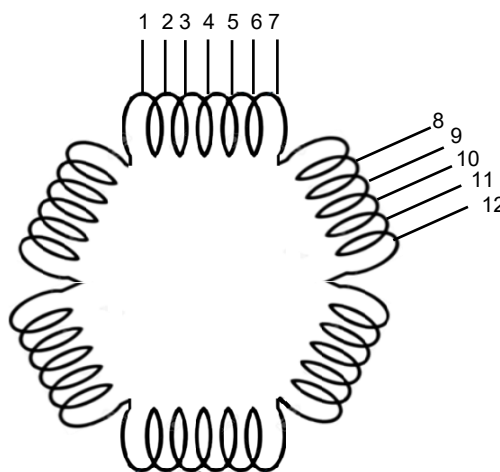


Figura 25 – Ilustração da bobinagem do motor de indução preparado para simulação da falha

Para simular curto-circuitos entre espiras, optou-se por modificar as bobinas de maior passo polar, especificamente as que abrangem o passo de 1 a 12. Estas modificações foram implementadas em um dos grupos de bobinas pertencentes às fases U e V. A representação esquemática da bobine modificada e a sua inserção nas fases U e V podem ser visualizadas nas Figuras 26 e 27, proporcionando uma melhor compreensão das alterações efetuadas.

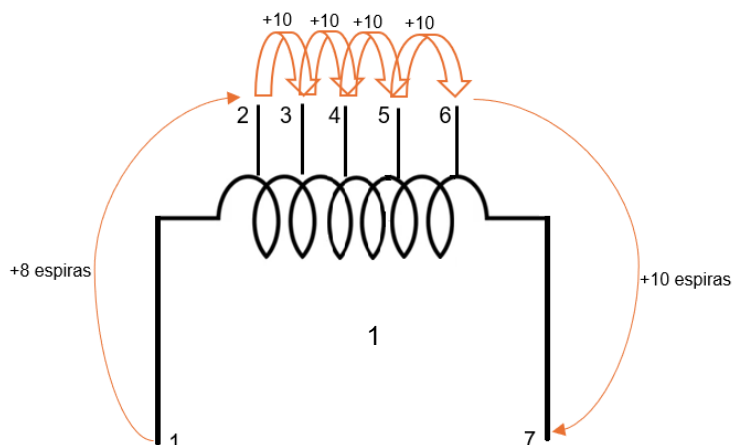


Figura 26 - Esquema representativo da bobina modificada do passo polar 1 a 12, inserida na Fase U[76]

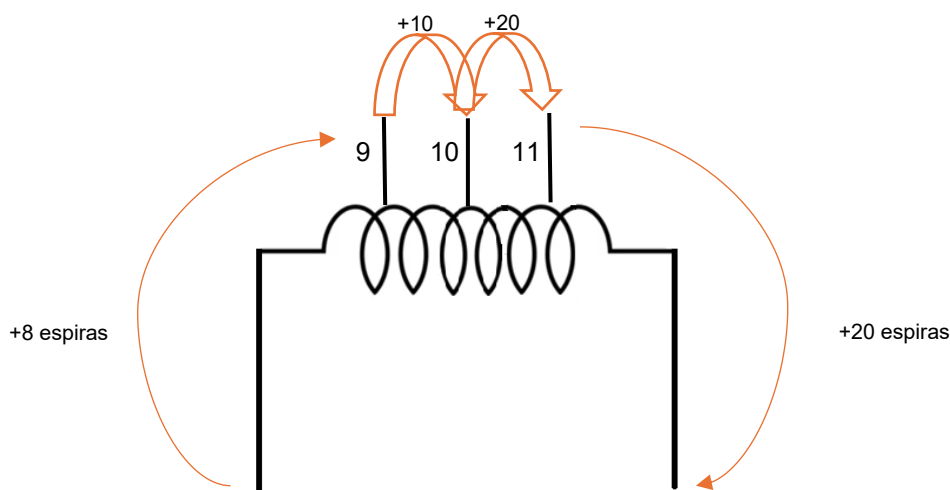


Figura 27 - Esquema representativo da bobina modificada do passo polar 1 a 12, inserida na Fase V[76]

Nas Figuras 26 e 27 podem ser visualizadas as numerações adotadas para os terminais presentes na placa e que permitem efetuar o curto-circuito entre espiras. Estas representam pontos de acesso a um certo número de espiras, permitindo,

quando estas são curto-circuitadas, estabelecer curto-circuitos entre espiras. De modo a limitar a corrente que percorre o curto-circuito, utilizaram-se resistências entre os terminais. No motor rebobinado para o efeito, a placa de ligações – Figura 28 - permite ao realizar diferentes curto-circuitos entre espiras de forma rápida e fácil.

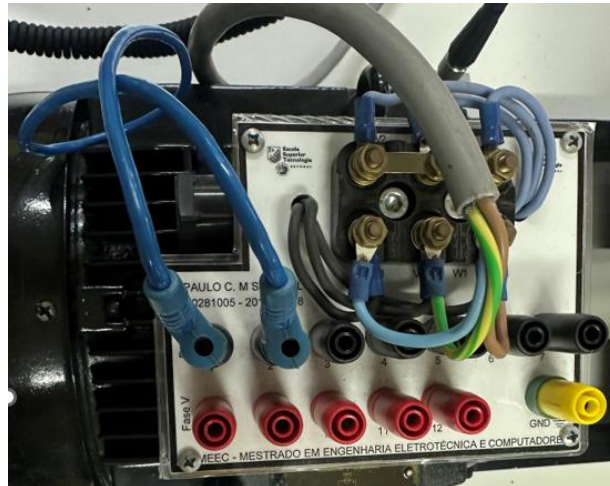


Figura 28 - Placa de Ligações interativa presente no Motor de Indução modificado para realizar o ensaio do curto-circuito (Motor A)

O motor B foi utilizado para o ensaio das falhas seguintes, uma vez que aconteceu um curto-circuito nos enrolamentos no motor A, conforme demonstra a Figura 29.



Figura 29 – Fotografia do curto-circuito nos enrolamentos do moto A

Para a simulação da falha da excentricidade não foi necessário proceder a qualquer alteração física no motor, foi sim utilizado um acessório perfurado conforme mostra a Figura 30, onde é possível colocar diferentes pesos em diferentes

localizações sendo estas mais próximas ou não do eixo de rotação do rotor. Na realização do ensaio foram colocados vários pesos no acessório de maneira a deslocar o centro de massa do mesmo. Esta excentricidade designa-se de excentricidade estática, na medida em que existe deslocação do centro de rotação do rotor. Na imagem abaixo pode-se ver o acessório em um dos ensaios realizados em que foram colocados diversos pesos em pontos diferentes.

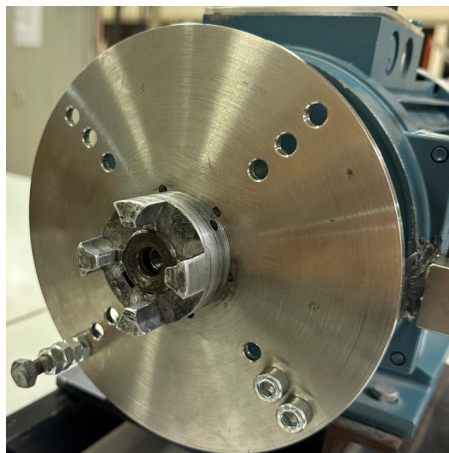


Figura 30 - Acessório utilizado para simulação da falha de excentricidade

Ainda foi realizado um último ensaio de falha de estator com o motor B, em que foi colocada uma resistência variável externa em série com uma das fases do motor. O aumento de forma gradual da resistência externa provoca um desequilíbrio nas impedâncias dos enrolamentos e o correspondente desequilíbrio das correntes nas fases. Assim registou-se as diferentes assinaturas de vibração para cada um dos cenários podendo assim analisar a severidade de cada um.

Ao provocar a falha de forma progressiva em vez de abrupta, o estudo consegue ser o mais próximo possível de cenários reais de falha, como maus contactos intermitentes ou fusíveis em regime de falha, que evoluem gradualmente. Para esse efeito foi utilizada uma resistência variável ligada aos terminais do motor B, conforme mostra a Figura 31.

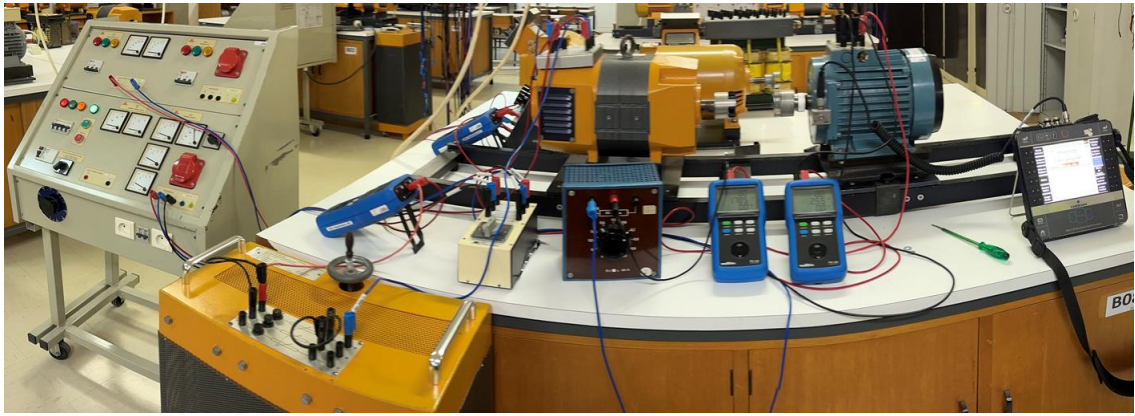


Figura 31 – Fotografia do ensaio onde foi utilizado o motor B

3.3.2. Posicionamento dos Acelerómetros

O posicionamento adequado dos acelerómetros é crucial para a eficácia da deteção de falhas. Quando se posiciona um acelerómetro deve-se escolher o caminho mais curto entre a fonte das vibrações (normalmente o rotor) e um ponto onde se possa efetuar as medidas. Normalmente isto resulta que se efetuam as medidas nas caixas das chumaceiras ou em qualquer estrutura rígida a elas ligada. Com base em análise teórica e estudos preliminares e a estrutura do motor foi identificada a melhor posição estratégica para a instalação do acelerómetro triaxial, conforme ilustrado na Figura 31 [49].

O acelerómetro foi fixado ao motor A, utilizando uma base magnética de alta rigidez para posições temporárias. No motor B, como este tem a carcaça em alumínio, foi usada uma resina epóxi para instalações permanentes, garantindo o acoplamento mecânico adequado. A Figura 32 mostra o posicionamento escolhido para a aplicação do acelerómetro nos ensaios.

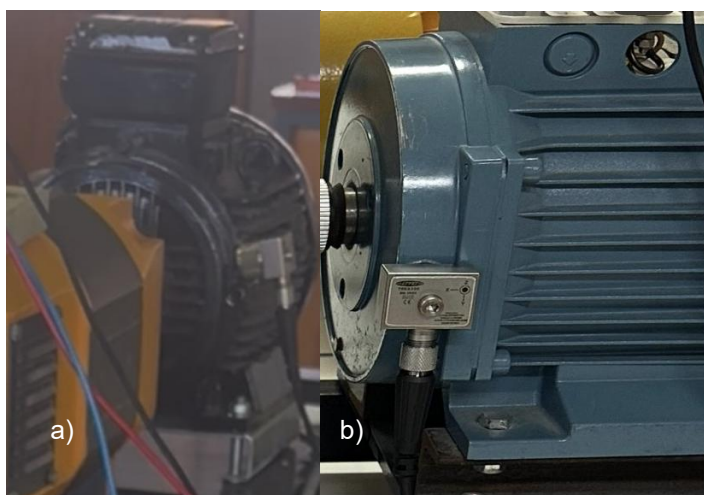


Figura 32 - Posicionamento escolhido para aplicação do acelerómetro em, a) Motor A e b) Motor B

3.3.3. Protocolo de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados utilizado é compatível com a aquisição de uma assinatura vibracional nos três eixos ortogonais. O sistema de aquisição escolhido foi o *AMS 2140 Machinery Health Analyzer* da Emerson. Este opera transformando a energia mecânica da vibração em sinais elétricos que podem ser analisados. O seu funcionamento começa com a aquisição destes sinais elétricos através de acelerómetros, sendo capaz de recolher dados de múltiplos canais simultaneamente. Essa capacidade multicanal é essencial, pois permite a medição da vibração nos três eixos ortogonais (axial, horizontal e vertical) de uma só vez, garantindo que a manifestação espacial completa de qualquer falha seja capturada. É bastante utilizado na indústria atualmente, por ser considerado bastante robusto e com elevado grau de fiabilidade na recolha dos dados.

3.3.4. Ensaios Efetuados

Por forma a avaliar a robustez da metodologia apresentada foram realizados diversos ensaios com diferentes combinações de carga utilizando o motor A e B.

O motor A foi utilizado para as condições normais de funcionamento e para a simulação de falhas internas:

- **Condição Normal (Sem Falha):** O motor A foi testado em condições normais (sem falha), tanto em vazio quanto em regime de carga.
- **Falha de Rotor (Barras Quebradas):** A falha foi implementada através da criação de duas barras partidas no rotor, sendo os dados adquiridos apenas em condição de carga.
- **Falha de Estator (Curto-circuito entre espiras):** Esta falha foi simulada por meio de um *shunt* na placa preparada para o efeito, e os ensaios foram realizados sob condição de carga.

O Motor B não está preparado para falhas internas, foi necessário provocar o desequilíbrio das falhas através da resistência externa:

- **Excentricidade:** Esta falha foi simulada através da colocação de uma massa no disco acoplado ao rotor de forma a criar o desequilíbrio no rotor.
- **Desequilíbrio de Fases:** Esta falha de estator foi simulada pela inserção de uma resistência de 14 Ω em série com uma das fases, com a aquisição de dados efetuada sob condição de carga.

Para cada combinação, vazio e em carga, foram realizadas medições com o motor em condição normal (sem falhas). Com esta recolha conseguiu-se ter uma referência para os diferentes ensaios. Esta abordagem permitiu que se conseguisse obter um conjunto de dados significativo, permitindo uma avaliação detalhada da eficácia do método em diferentes cenários operacionais.

Adicionalmente, foi realizado um teste específico ao acelerómetro que se utilizou para garantir o seu bom funcionamento e que o mesmo se encontrava calibrado e sem nenhum *offset*.

3.4. Processamento e Análise de Dados

3.4.1. Processamento dos Sinais

O processamento dos sinais é iniciado aquando da recolha de dados junto ao motor. O *software* interno do AMS 2140 calcula a Transformada Rápida de Fourier (FFT), convertendo o sinal adquirido no domínio do tempo num espectro de frequência. As medições podem ser ajustadas para remover qualquer componente contínua indesejada que exista, centrando o sinal do acelerómetro em torno de zero. Foram recolhidas medições em cinco frequências de amostragem distintas 100Hz, 200Hz, 300Hz, 400Hz e 500Hz para cada eixo ortogonal. Foi observado o espectro nas cinco frequências e selecionado o que continha as maiores amplitudes.

Para o tratamento, análise e gestão de todo o sinal de vibrações recolhido, foi utilizado o *software AMS Machinery Manager*. É importante sublinhar que este *software* é o pacote de gestão e análise nativo da mesma plataforma (Emerson/AMS) que o sistema de aquisição de dados em campo, o *AMS 2140*. Esta compatibilidade assegura uma integração total e perfeita de todos os dados recolhidos pelo equipamento de campo, permitindo uma gestão eficiente da base de dados, conforme mostra a Figura 33. Neste *software* o sinal é convertido para o domínio do tempo com a unidade de aceleração selecionada a ser o *g*. Esta foi a unidade escolhida, devido às características do acelerómetro escolhido pois este apresenta uma sensibilidade de $100mV/g$. Com a utilização do *software Excel* converteu-se as 4072 amostras recolhidas por cada eixo em milivolt.

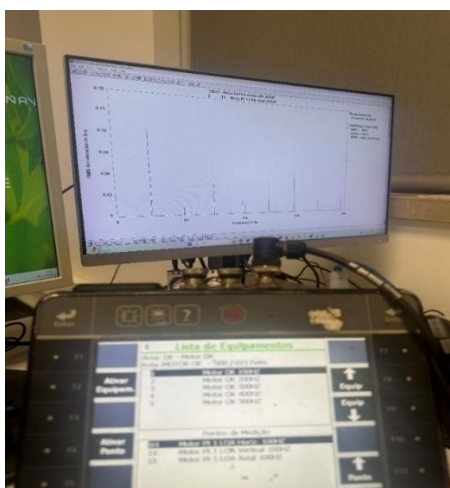


Figura 33 – Tratamento do sinal vibratório no AMS 2140 para o Machinery Manager

3.4.2. Algoritmos de Detecção e Diagnostico

A detecção e diagnostico das falhas é baseada na análise de padrões geométricos de coordenadas X, Y e Z, utilizando para a sua representação tridimensional o *software MATLAB*.

O principal método de detecção e diagnostico nesta abordagem é a visualização tridimensional das componentes escalares do sinal de aceleração enviado pelo acelerómetro em milivolt, permitindo que seja uma abordagem mais intuitiva e padronizada. A entrada para o nosso sistema gráfico será a saída do acelerómetro triaxial (V_x , V_y e V_z). Estas três componentes são proporcionais à aceleração e são mapeados diretamente nos eixos cartesianos X, Y e Z.

Por exemplo, num motor a funcionar sem falhas, sem vibrações ambientais, o que se espera é uma distribuição uniforme em torno da origem. Se estiver na presença de uma falha é espectável que o gráfico que era uniforme apresente alguma distorção, se alongue ou forme uma figura geométrica específica.

A classificação deste método é intuitiva e com ele é possível diagnosticar a falha comparando a geometria observada com os padrões de falha conhecidos, que são obtidos através de falhas induzidos.

Capítulo 4: Resultados e Discussão

4.1. Caracterização do Perfil de Vibração

Neste capítulo serão apresentados os resultados da caracterização das assinaturas vibratórias para o motor em condição sem falha e para cada um dos tipos de falha. Tendo em conta as características do motor foram encontradas as seguintes frequências fundamentais para a análise dos espectros:

$$\begin{aligned}f_s &= 50z \\f_R &= \frac{N_s}{60} \leftrightarrow \frac{1500}{60} = 25Hz \\N_p &= \frac{120 \times f}{N_s} \leftrightarrow \frac{120 \times 50}{1500} = 4 \text{ pólos} \\n^\circ \text{ barras} &= 12 \\f_{rbpf} &= f_R \times n^\circ \text{ barras} \leftrightarrow 25 \times 12 = 300Hz \\s &= \frac{N_s - N_r}{N_s} \leftrightarrow \frac{1500 - 1430}{1500} = 0,0467 \approx 4,47\% \\f_{rotor} &= s \times f \leftrightarrow 0,0467 \times 50 = 2,335Hz \\f_{ppf} &= n^\circ \text{ polos} \times f_{rotor} \leftrightarrow 4 \times 2,335 = 9,34Hz\end{aligned}$$

Os objetivos principais são apresentar os espectros de frequência associados a cada uma das falhas induzidas, apresentar graficamente a assinatura vibracional manifestada pela máquina sob as diferentes condições de falha e encontrar os padrões geométricos característicos de cada falha induzida.

A análise destes dados permitirá a identificação do tipo de falha e estabelecer uma correlação direta entre a falha da máquina e o seu padrão de resposta vibracional.

4.1.1. Motor Sem Falha

No início do 1º ensaio, procedeu-se à medição das vibrações do motor A enquanto este operava em condições normais. Este motor foi considerado como em condição “sem falha”. As Figuras 34, 35 e 36 apresentam os espectros de vibrações do motor A nas três componentes axiais, à velocidade nominal em vazio.

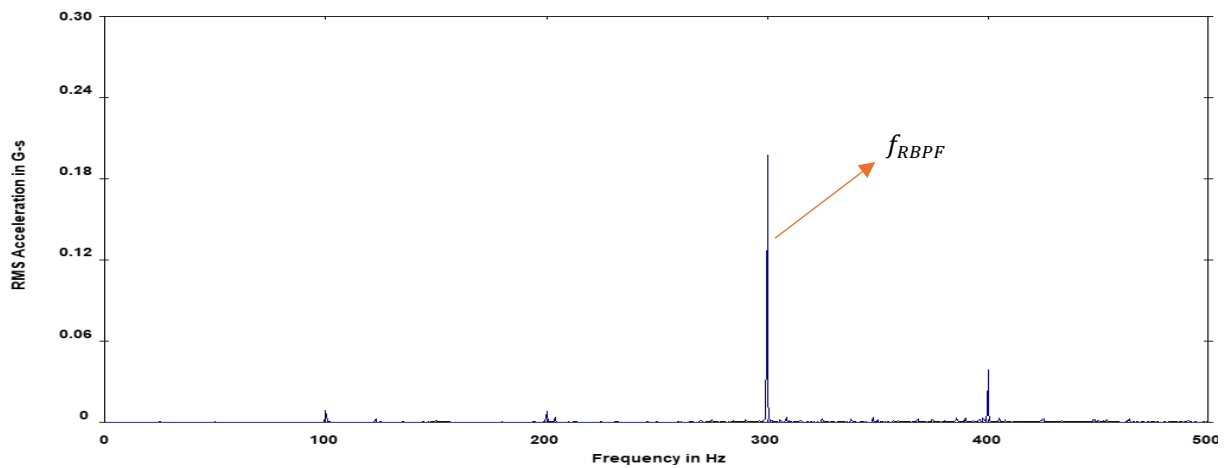


Figura 34 – Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor A em vazio

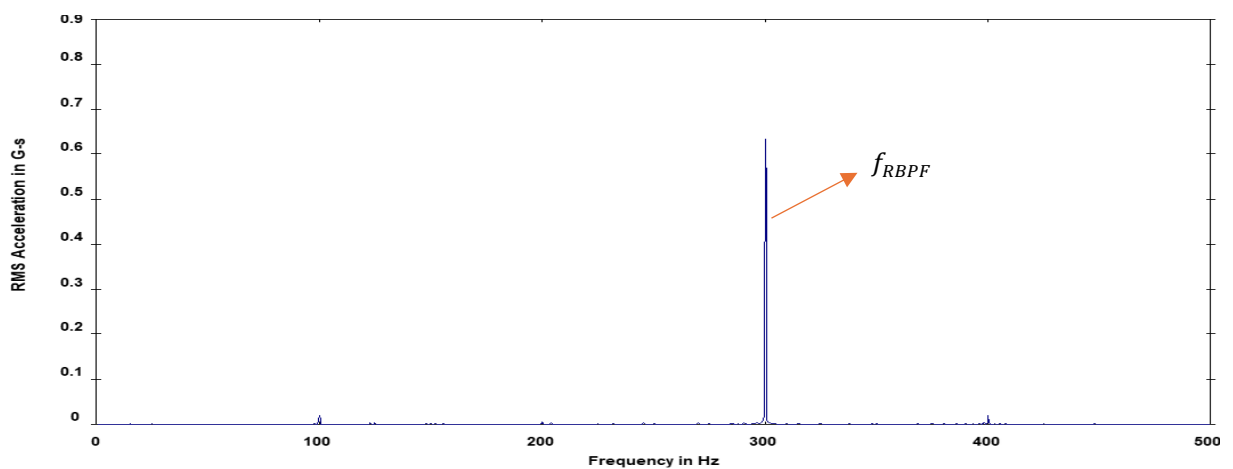


Figura 35 – Espectro de vibrações no eixo vertical do motor A em vazio

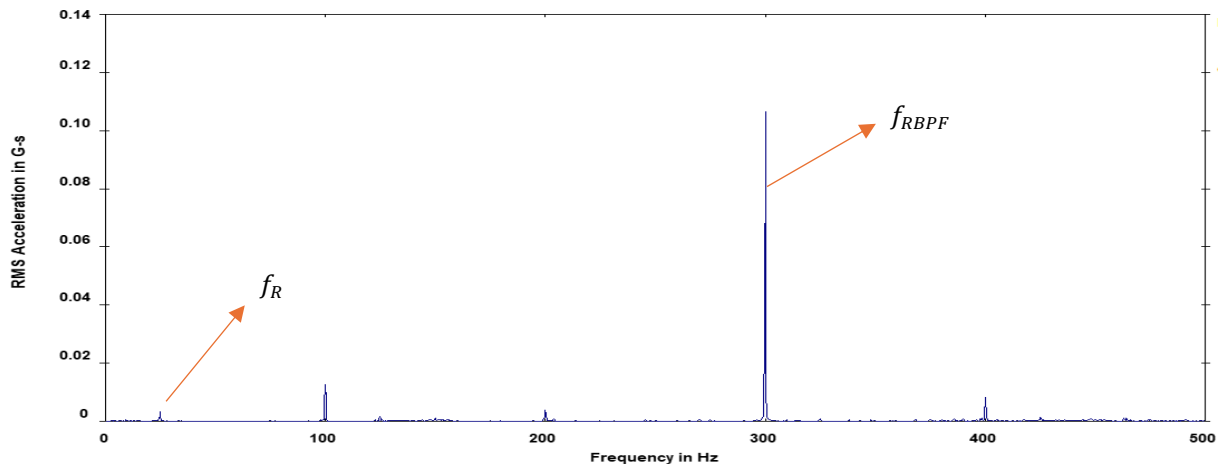


Figura 36 - Espectro de vibrações no eixo axial do motor A em vazio

Analisando os espectros que estão presentes nas Figuras 34, 35 e 36 observa-se a proeminência da f_{RBPF} , mas sem a presença de bandas laterais ou uma f_R elevada o que indica um diagnóstico de motor “sem falha”. A amplitude da f_{RBPF} é bastante elevada comparada com as restantes. Este fenómeno pode ocorrer devido ao motor estar a amplificar a 6^o harmónica da frequência da rede, devido a uma ressonância estrutural ou folga na base. O espectro de vibração sugere que o sistema de montagem (não o motor em si) não está OK, apesar de o rotor e o estator estarem em bom estado de funcionamento.

A Figura 37 apresenta um gráfico 3D das vibrações nas três direções onde é possível observar o padrão realizado pelas mesmas assim como onde existe maior incidência. Por fim, a Figura 38 apresenta os gráficos 2D numa tentativa de simplificar e organizar a informação presente no gráfico 3D.

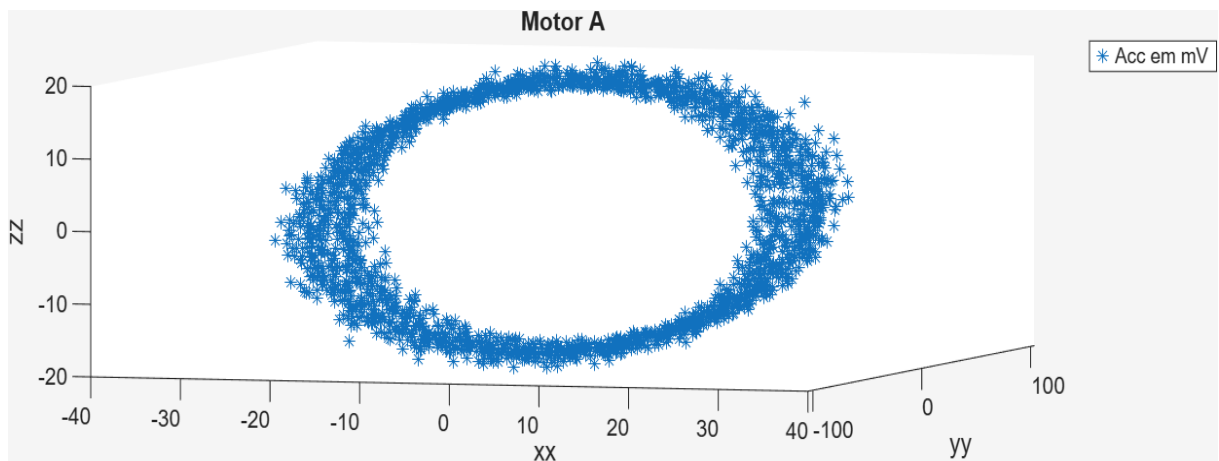


Figura 37 – Gráfico de dispersão de pontos de vibração do motor em mV A em vazio segundo os eixos cartesianos X, Y e Z.

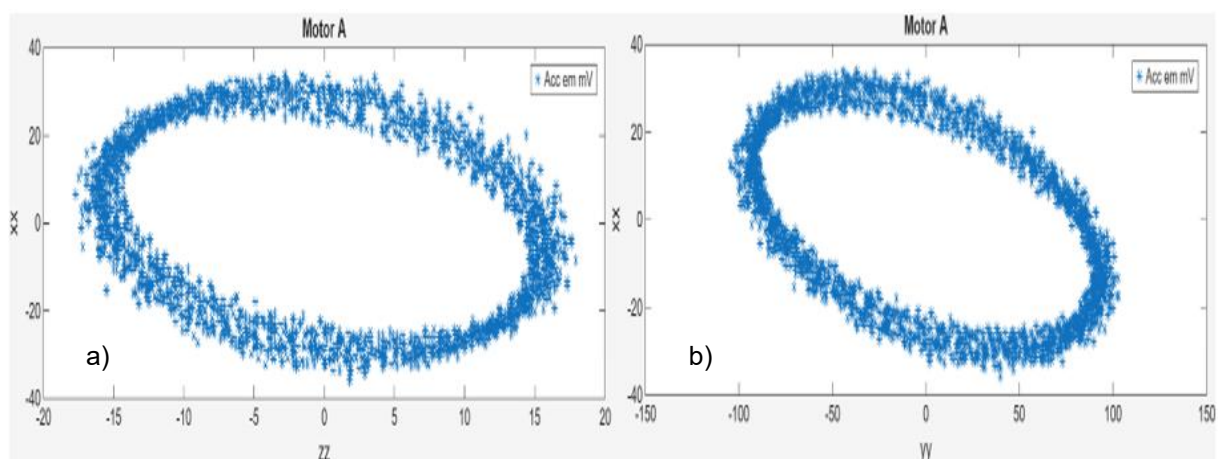


Figura 38 – Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos Z e X e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos Y e Z.

As vibrações do motor A foram também medidas à velocidade nominal e em carga. As Figuras 39, 40 e 41 apresentam os espectros de vibrações do motor A nas três componentes axiais.

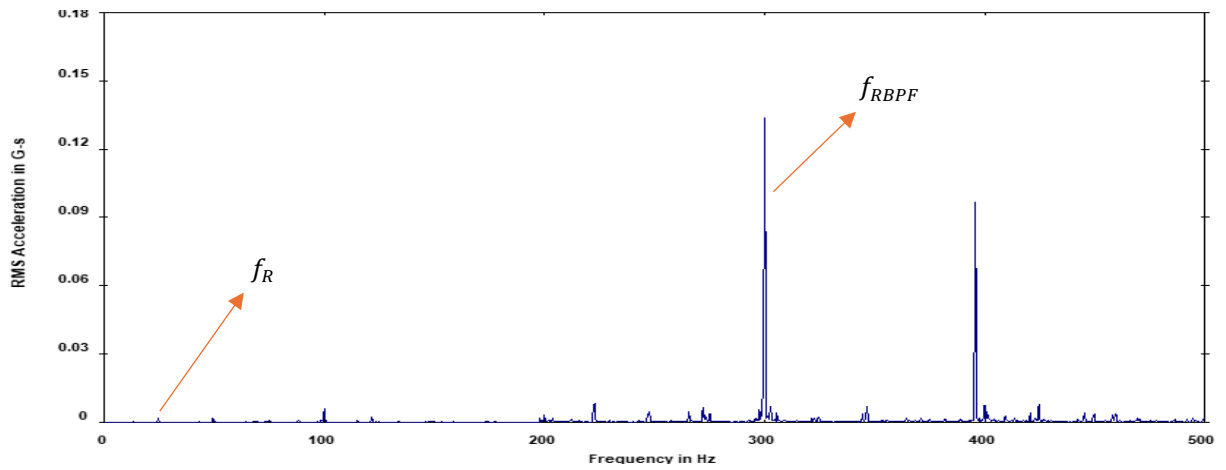


Figura 39 – Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor A em carga

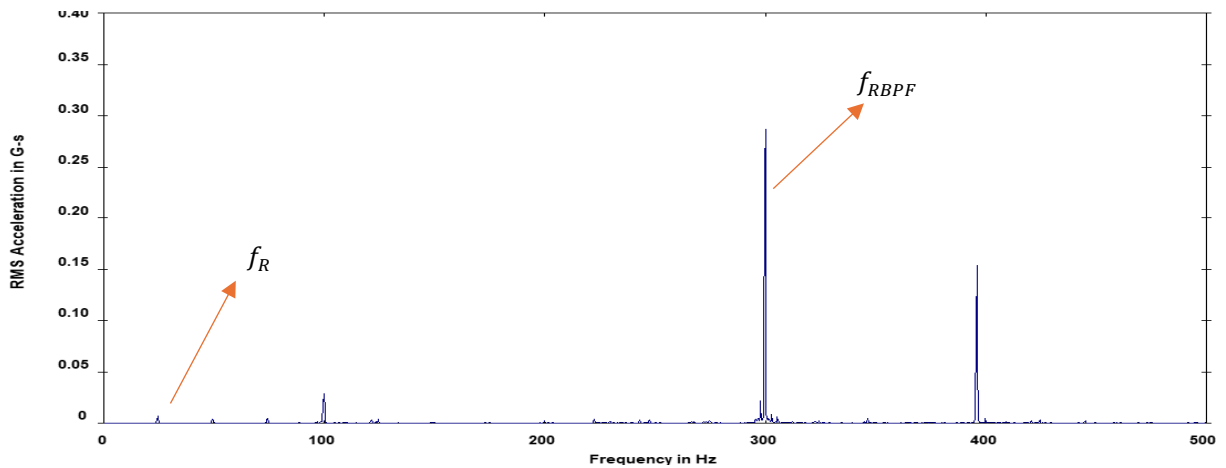


Figura 40 – Espectro de vibrações no eixo vertical do motor A em carga

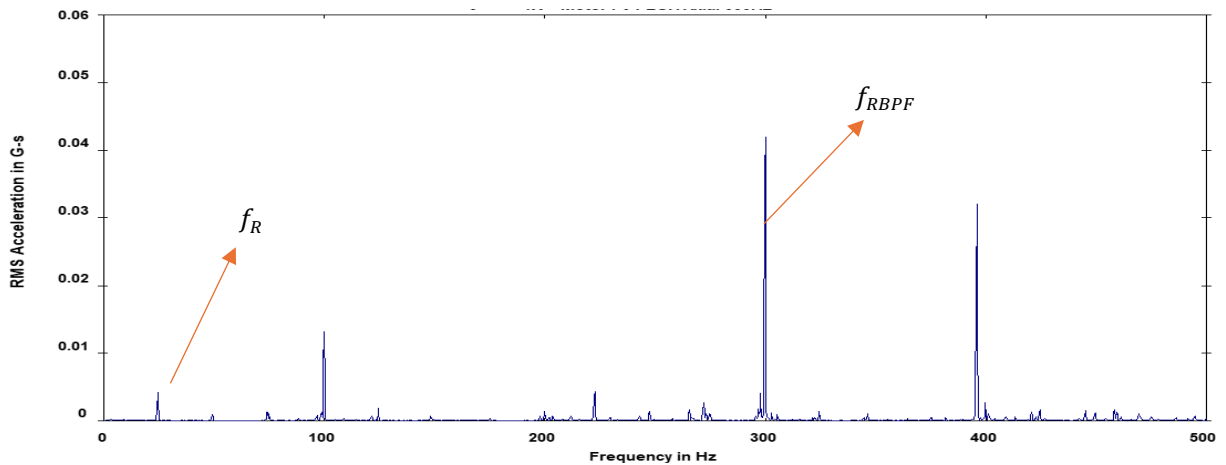


Figura 41 - Espectro de vibrações no eixo vertical do motor A em carga

Analisando os espectros que estão presentes nas Figuras 39, 40 e 41 observa-se a proeminência da f_{RBPF} , mas sem a presença de bandas laterais ou uma f_R elevada o que indica um diagnóstico de motor “sem falha”. A amplitude da f_{RBPF} é bastante elevada como aconteceu nas medições do motor em vazio, a exceção é o

surgimento de uma harmónica aos 400Hz. Este aparecimento pode ocorrer devido ao acoplamento elástico do motor não estar perfeitamente alinhado, assim como algum possível desalinhamento que exista da estrutura da base de apoio do motor. Estas condições devem ser as causas do aparecimento da 8ª harmónica da frequência da rede. O espectro de vibração sugere que o sistema de montagem (não o motor em si) não está OK, apesar de o rotor e o estator estarem em bom estado de funcionamento.

A Figura 42 apresenta um gráfico 3D das vibrações nas três direções onde é possível observar o padrão realizado pelas mesmas assim como onde existe maior incidência. Por fim, a Figura 43 apresenta os gráficos 2D numa tentativa de simplificar e organizar a informação presente no gráfico 3D.

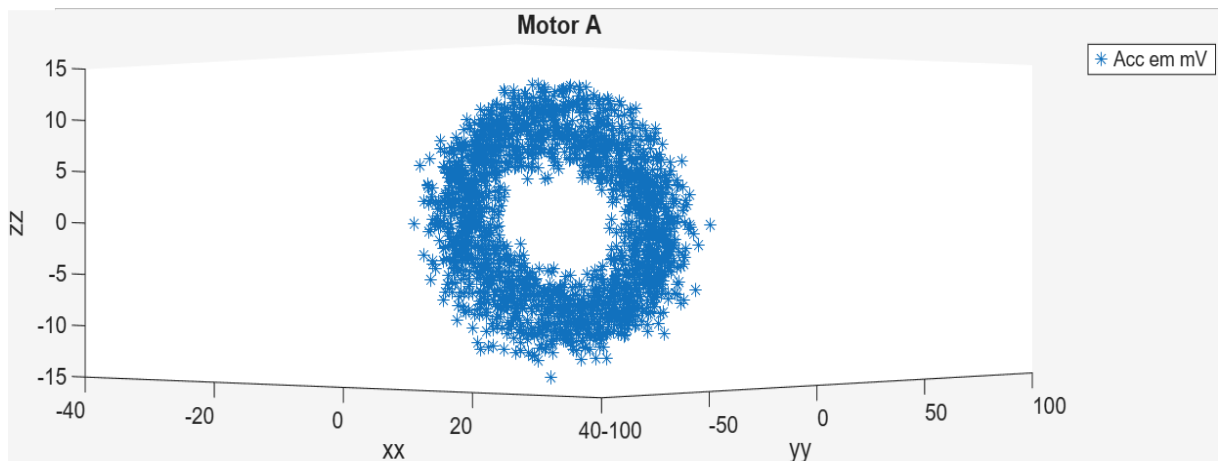


Figura 42 - Gráfico de dispersão de pontos de vibração do motor em mV A em carga segundo os eixos cartesianos X, Y e Z.

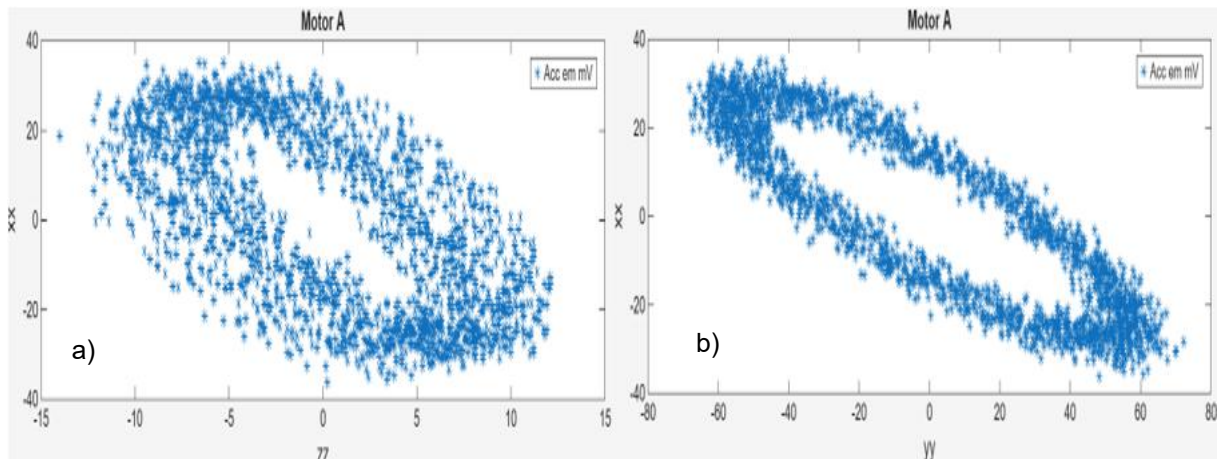


Figura 43 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Z e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y.

4.1.2. Falhas no Rotor

Na continuação do ensaio inicial, o motor A operou na condição de falha de rotor, caracterizada pela presença de duas barras do rotor partidas. Com esta falha induzido retiraram-se as vibrações nas três componentes axiais. As Figuras 44, 45 e 46 apresentam os espectros de vibrações do motor A, nas três componentes axiais, com o mesmo à velocidade nominal e com carga.

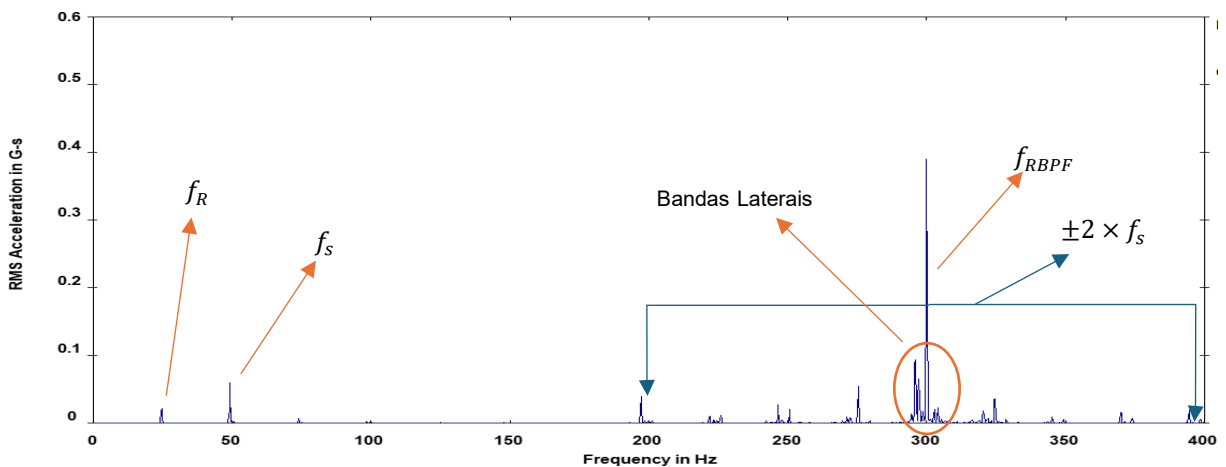


Figura 44 - Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor A em carga e com a falha de rotor simulado

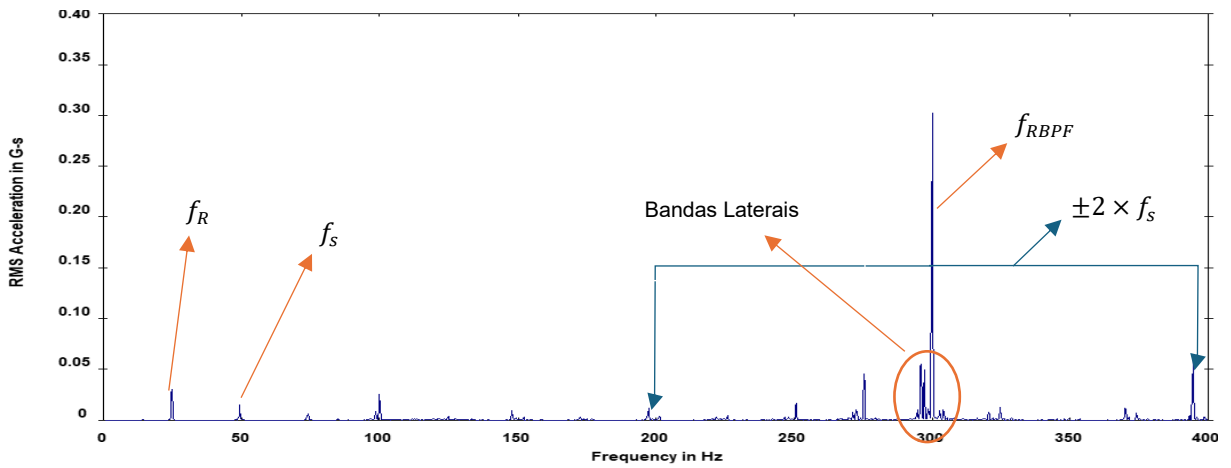


Figura 45 - Espectro de vibrações no eixo vertical do motor A em carga e com a falha de rotor simulado

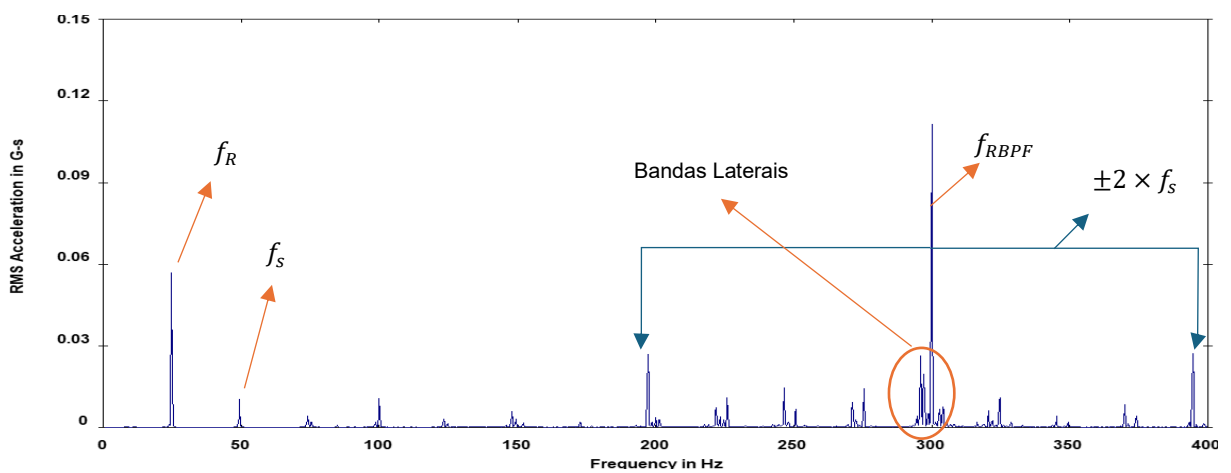


Figura 46 - Espectro de vibrações no eixo axial do motor A em carga e com a falha de rotor simulado.

Analisando os espectros presentes nas Figuras 44, 45 e 46 observa-se a proeminência da f_{RBPF} , com a presença de bandas laterais e uma f_R elevada o que indica um diagnóstico de motor “em falha”. A presença de bandas laterais em torno da f_{RBPF} é um indicativo de falha no rotor.

A Figura 47 apresenta um gráfico 3D das vibrações nas três direções onde é possível observar o padrão realizado pelas mesmas assim como onde existe maior incidência. Por fim, a Figura 48 apresenta os gráficos 2D numa tentativa de simplificar e organizar a informação presente no gráfico 3D.

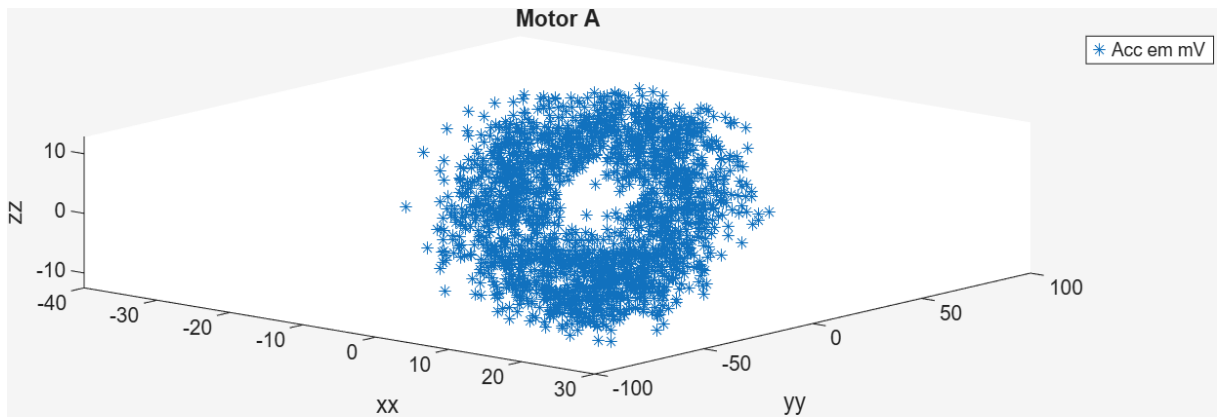


Figura 47 – Gráfico de dispersão de pontos de vibração em mV do motor A com a falha de rotor, em carga e acoplado segundo as coordenadas cartesianas X, Y e Z

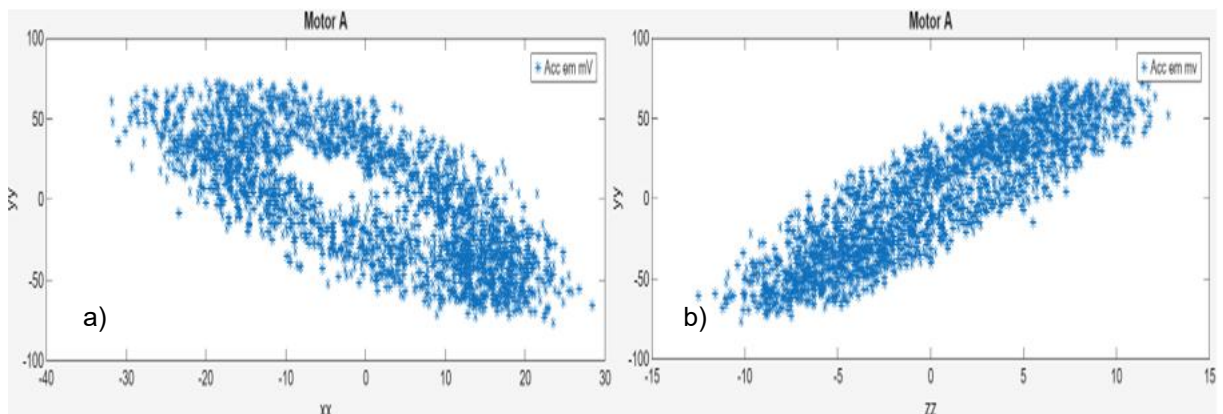


Figura 48 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y e b) apresenta valores dos eixos cartesianos Z e Y.

Como as vibrações causadas por defeito no rotor se intensificam à medida que a carga mecânica do motor aumenta, decidiu-se fazer nova medição das vibrações nos três eixos cartesianos X, Y e Z com o motor em carga. As Figuras 49, 50 e 51 apresentam os espectros de vibrações do motor A, nas três componentes axiais, à velocidade nominal, acoplado e com carga no segundo ensaio efetuado.

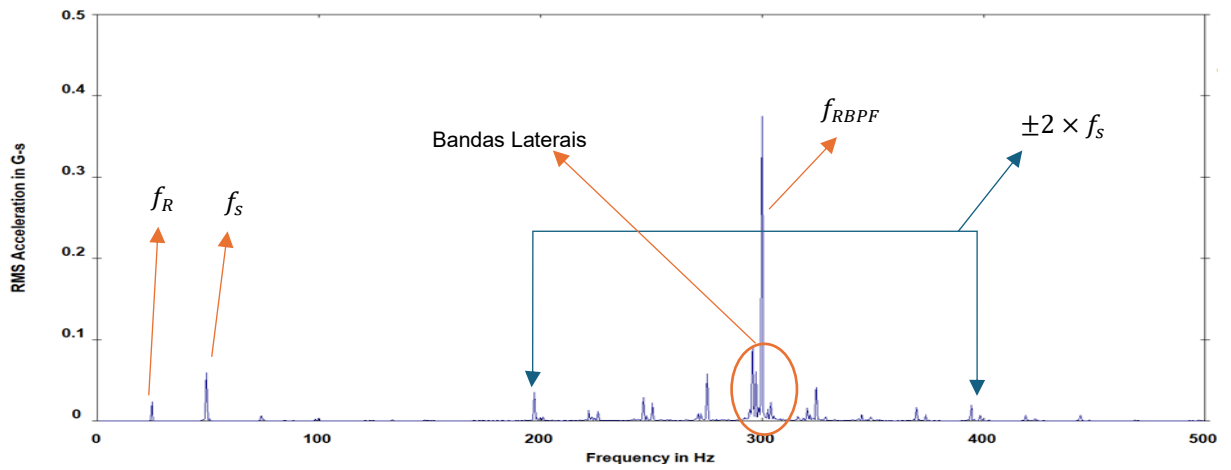


Figura 49 – Espectro de vibrações do segundo ensaio no eixo horizontal do motor A em carga e com a falha de rotor simulado

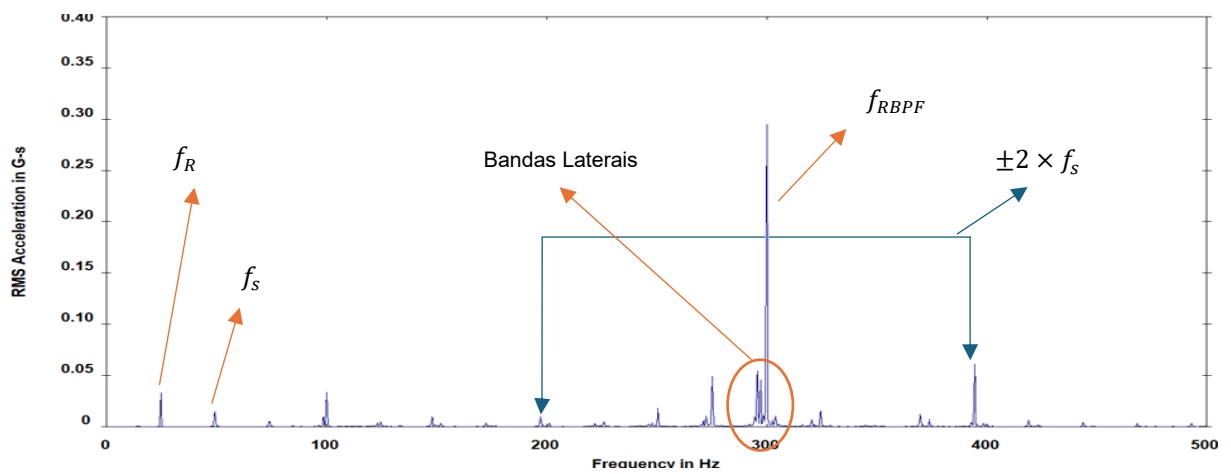


Figura 50 – Espectro de vibrações do segundo ensaio no eixo vertical do motor A em carga e com a falha de rotor simulado

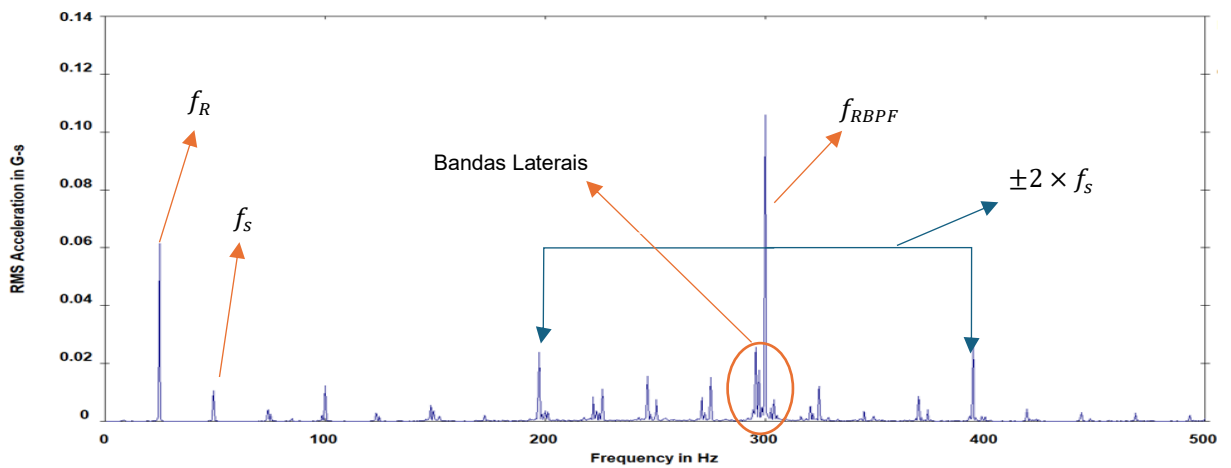


Figura 51 – Espectro de vibrações do segundo ensaio no eixo axial do motor A em carga e com a falha de rotor simulado

Analisando os espectros presentes nas Figuras 49, 50 e 51 observa-se a proeminência da f_{RBPF} , com a presença de bandas laterais e uma f_R elevada o que indica um diagnóstico de motor “em falha”. A presença de bandas laterais em torno da f_{RBPF} é um indicativo de falha no rotor.

A Figura 52 apresenta um gráfico 3D das vibrações nas três direções onde é possível observar o padrão realizado pelas mesmas assim como onde existe maior incidência. Por fim, a Figura 53 apresenta os gráficos 2D numa tentativa de simplificar e organizar a informação presente no gráfico 3D.

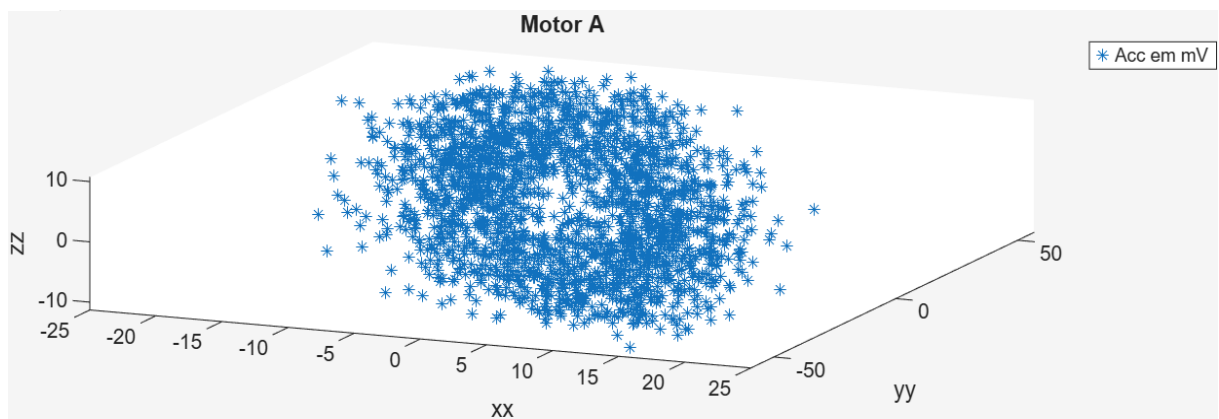


Figura 52 – Gráfico de dispersão de pontos de vibração em mV do motor A com a falha de rotor, em carga e acoplado segundo as coordenadas cartesianas X, Y e Z.

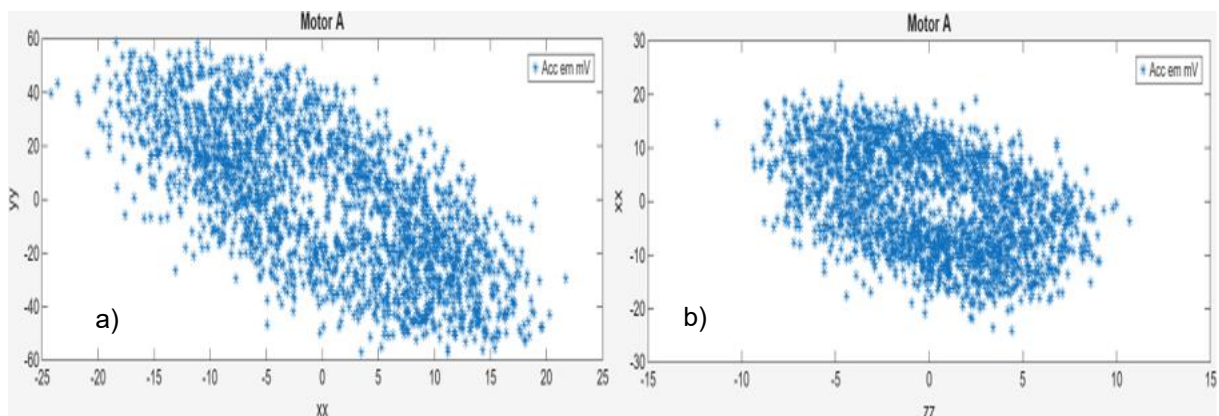


Figura 53 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos Z e X.

4.1.3. Falhas no Estator

O ensaio de falha de estator realizou-se com a medição das vibrações no motor A configurado para a falha de curto-circuito entre espiras. Esta falha foi implementada de forma controlada através de um shunt estabelecido entre os terminais 1 e 2 da placa preparada para o efeito, afetando um total de oito espiras. Com este defeito induzido no estator, finalizaram-se as recolhas de vibrações nas três componentes axiais. As Figuras 54, 55 e 56 apresentam os espectros de vibrações do motor A nas três componentes axiais, à velocidade nominal, acoplado e com carga.

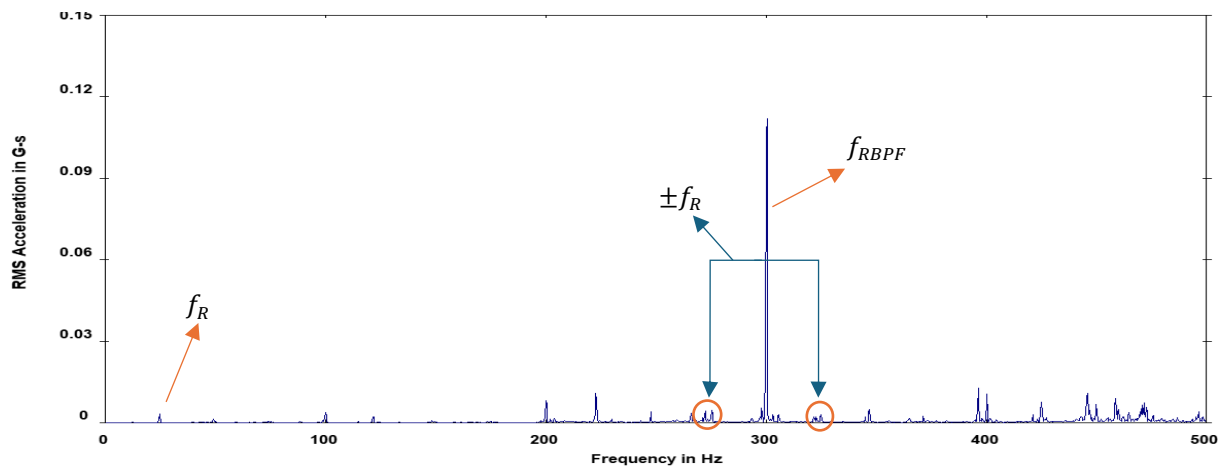


Figura 54 - Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor A em carga e com a falha de curto-circuito entre espiras, oito espiras no total

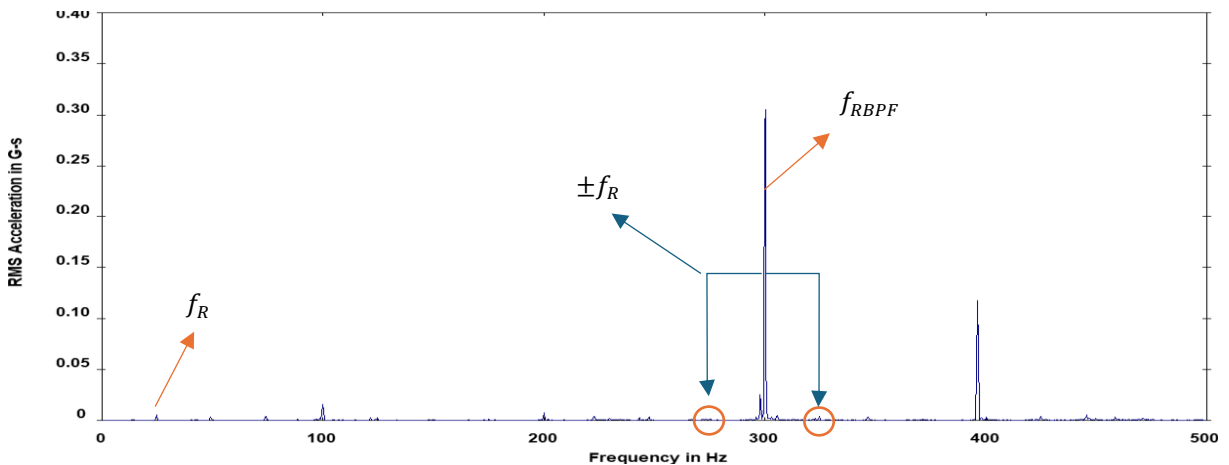


Figura 55 - Espectro de vibrações no eixo vertical do motor A em carga e com a falha de curto-circuito entre espiras, oito espiras no total

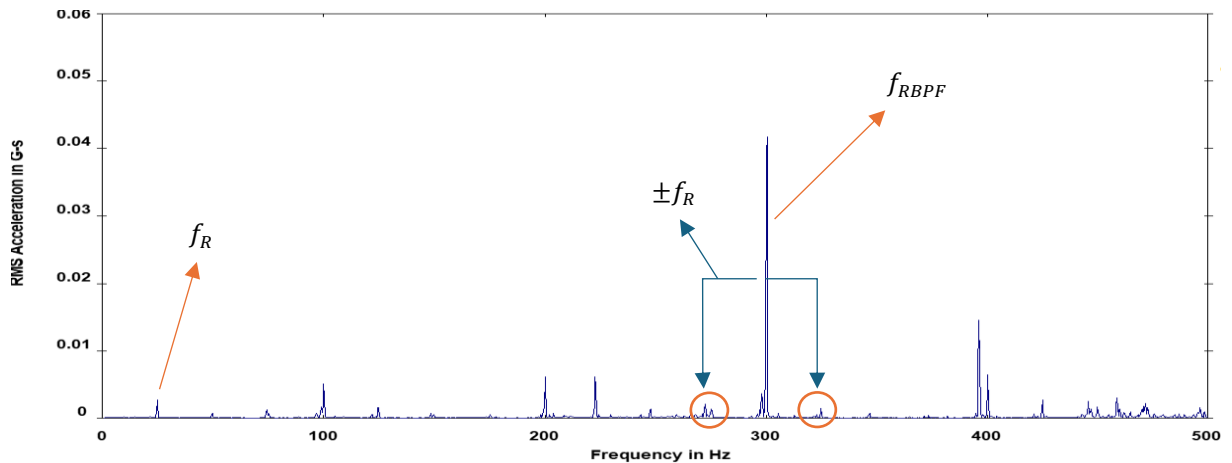


Figura 56 - Espectro de vibrações no eixo axial do motor A em carga e com a falha de curto-circuito entre espiras, oito espiras no total.

Analisando os espectros presentes nas Figuras 54, 55 e 56 observa-se a proeminência da f_{RBPF} , com a presença de bandas laterais a $\pm f_R$ e o aparecimento de um espectro $2 \times f_S$ com as respectivas harmônicas indicam a presença de uma falha elétrica, com o diagnóstico de motor a ser “em falha”. A presença de bandas laterais de $\pm f_R$ em torno da frequência de rotação do rotor é um indicativo de problemas no estator, mas somente com a presença do espectro $2 \times f_S$ e das suas harmônicas, o diagnóstico de falha elétrica fica confirmado.

A Figura 57 apresenta um gráfico 3D das vibrações nas três direções onde é possível observar o padrão realizado pelas mesmas assim como onde existe maior incidência. Por fim, a Figura 58 apresenta os gráficos 2D numa tentativa de simplificar e organizar a informação presente no gráfico 3D.

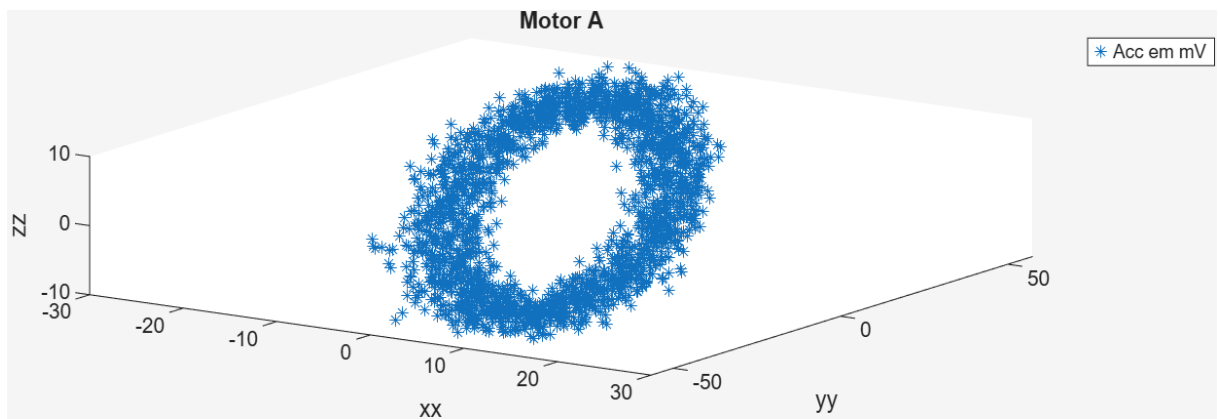


Figura 57 - Gráfico de dispersão de pontos de vibração em mV do motor A com a falha curto-circuito entre espiras, oito no total, em carga e acoplado segundo as coordenadas cartesianas X, Y e Z

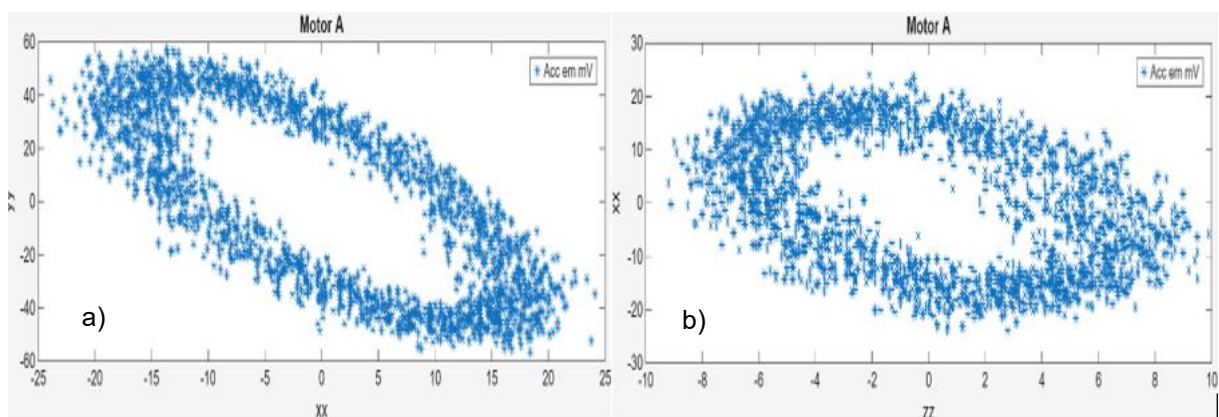


Figura 58 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos Z e X.

No 2º ensaio laboratorial foi utilizado o motor B, este foi sujeito a alterações numa das fases da sua alimentação com a adição de uma resistência de 14Ω . As Figuras 59, 60 e 61 apresentam os espectros de vibrações do motor B nas três componentes axiais, à velocidade nominal e em vazio.

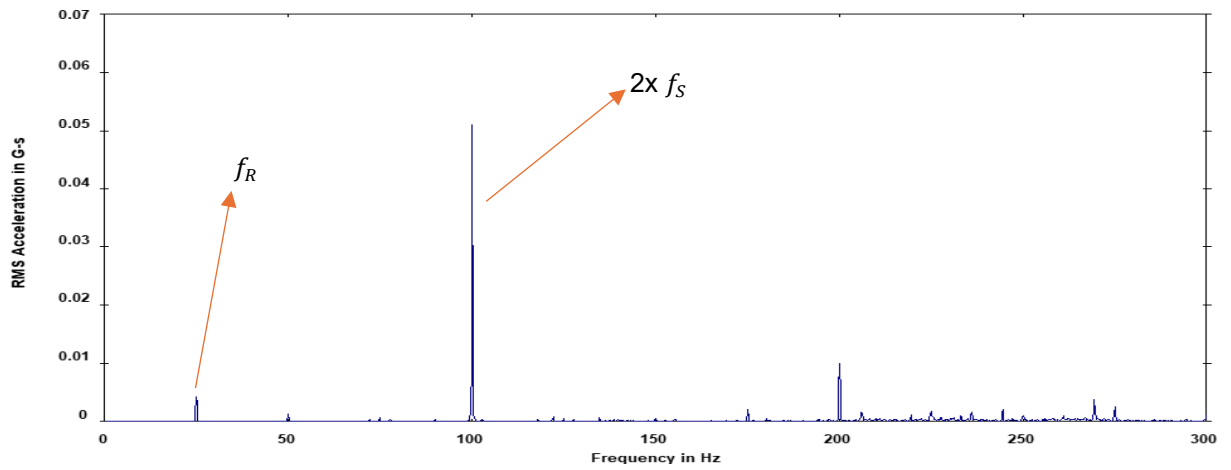


Figura 59 - Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor B em vazio, com a adição de uma resistência de 14Ω numa das fases

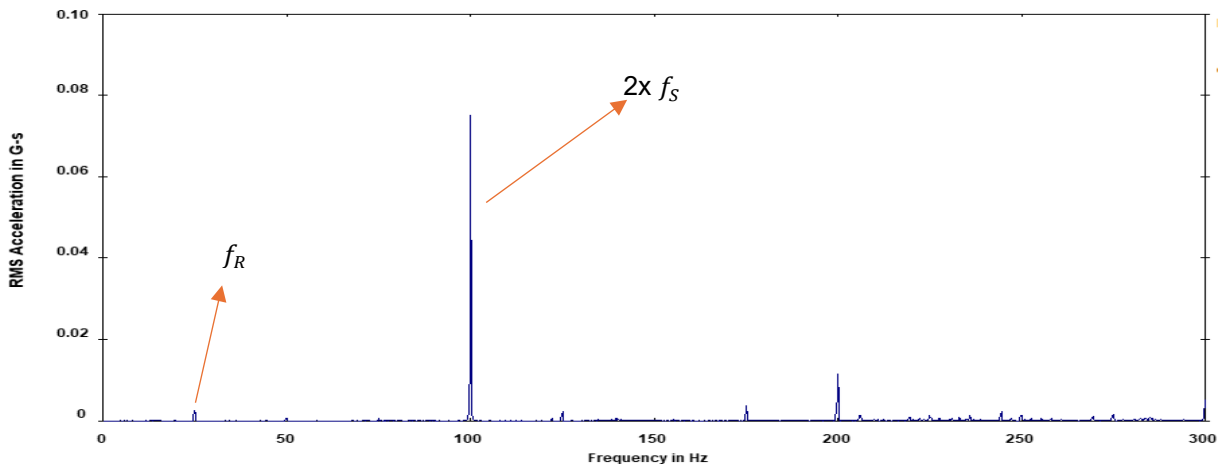


Figura 60 - Espectro de vibrações no eixo vertical do motor B em vazio, com a adição de uma resistência de 14Ω numa das fases

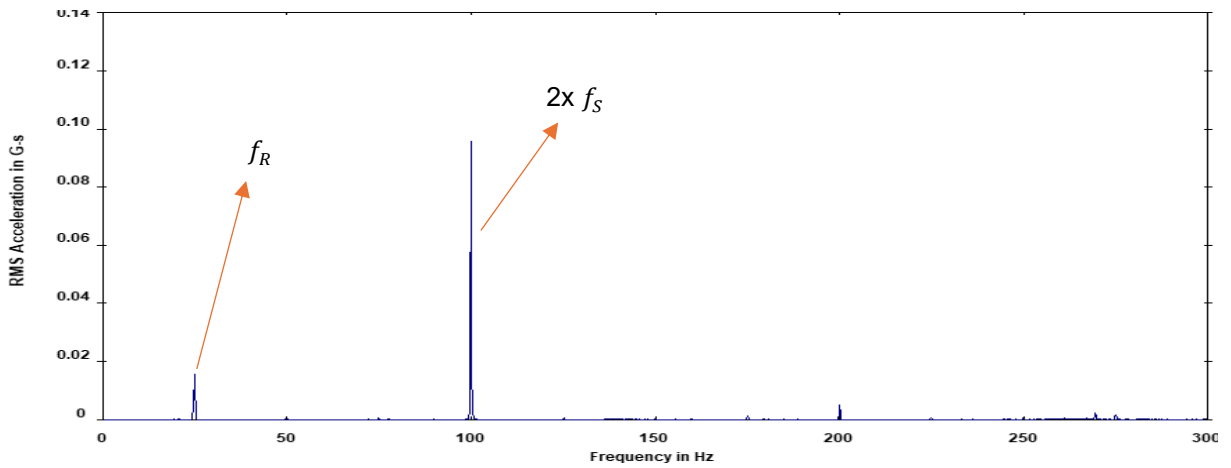


Figura 61 - Espectro de vibrações no eixo axial do motor B em vazio, com a adição de uma resistência de 14 Ω numa das fases

Analisando os espectros presentes nas Figuras 59, 60 e 61 observa-se a proeminência de um espectro $2 \times f_s$ com as respectivas harmônicas o que indica a presença de uma falha elétrica, com o diagnóstico de motor a ser “em falha”. Com a presença do espectro $2 \times f_s$ e das suas harmônicas, o diagnóstico de falha elétrica fica confirmado.

A Figura 62 apresenta um gráfico 3D das vibrações nas três direções onde é possível observar o padrão realizado pelas mesmas assim como onde existe maior incidência. Por fim, a Figura 63 apresenta o gráfico retirado a partir da *Transforma de Clarke* numa tentativa de simplificar e organizar a informação presente no gráfico 3D.

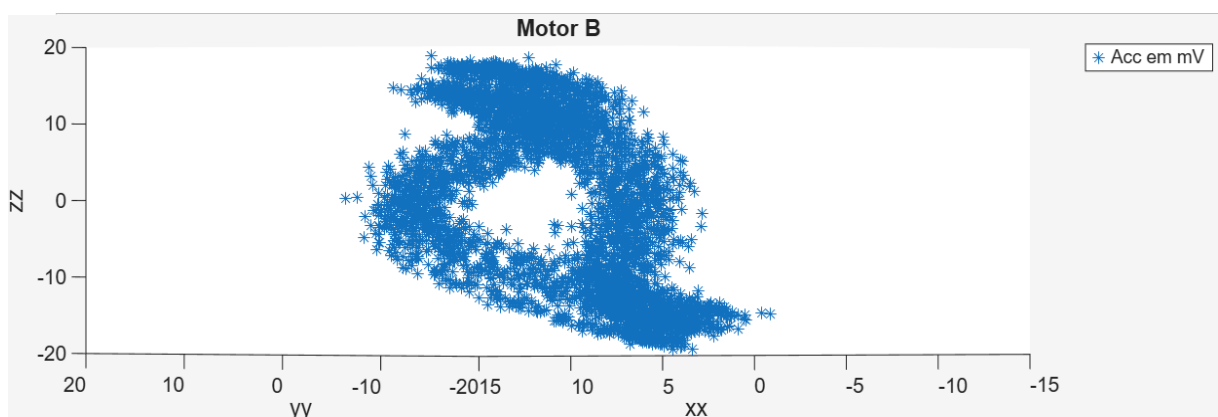


Figura 62 - Gráfico de dispersão de pontos de vibração do motor B em vazio com a adição de uma resistência de 14 Ω colocada numa das fases, segundo as coordenadas cartesianas X, Y e Z

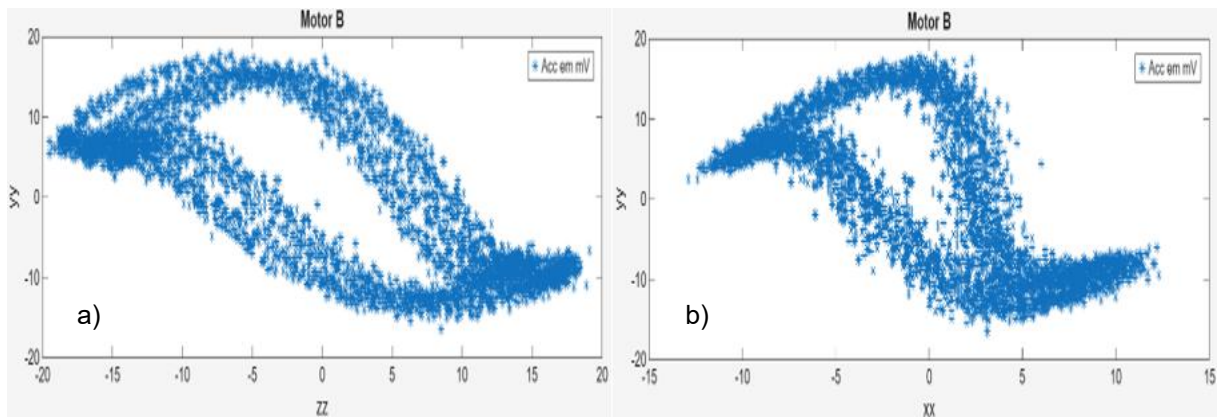


Figura 63 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos Z e Y e o b) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y.

4.1.4. Excentricidade

Na continuação do 2º ensaio, para o qual foi utilizado o motor B, procedeu-se à indução da falha da excentricidade, esta falha foi induzida indiretamente através da colocação de um desequilíbrio de massa no rotor do motor B. Iniciou-se o ensaio com uma massa de aproximadamente 45 gramas e com este defeito induzido retiraram-se as vibrações nas três componentes axiais. As Figuras 64, 65 e 66 apresentam os espectros de vibrações do motor B nas três componentes axiais, à velocidade nominal, em vazio.

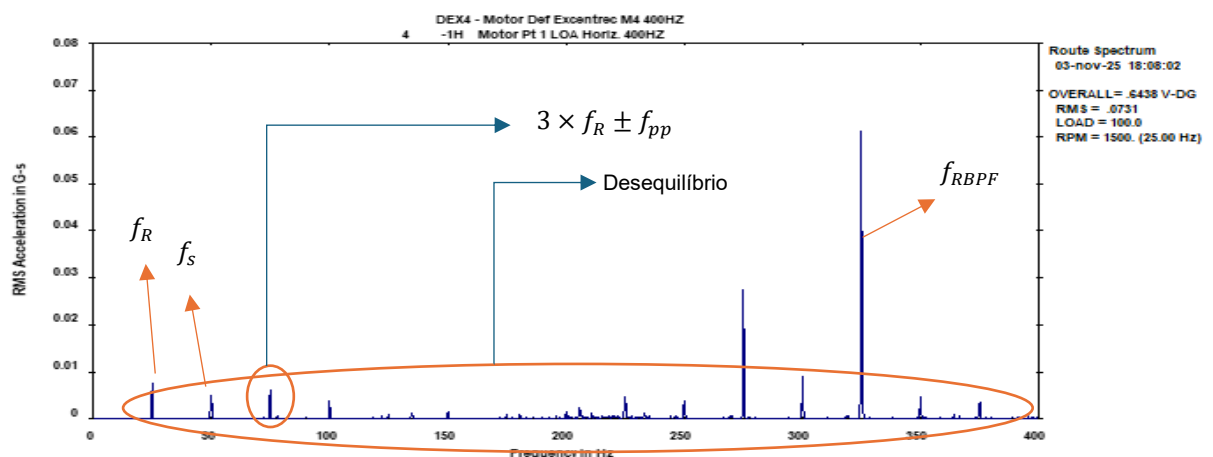


Figura 64 - Espectro de vibrações no eixo horizontal do motor B em vazio e com a falha de excentricidade com colocação de uma massa de 45g

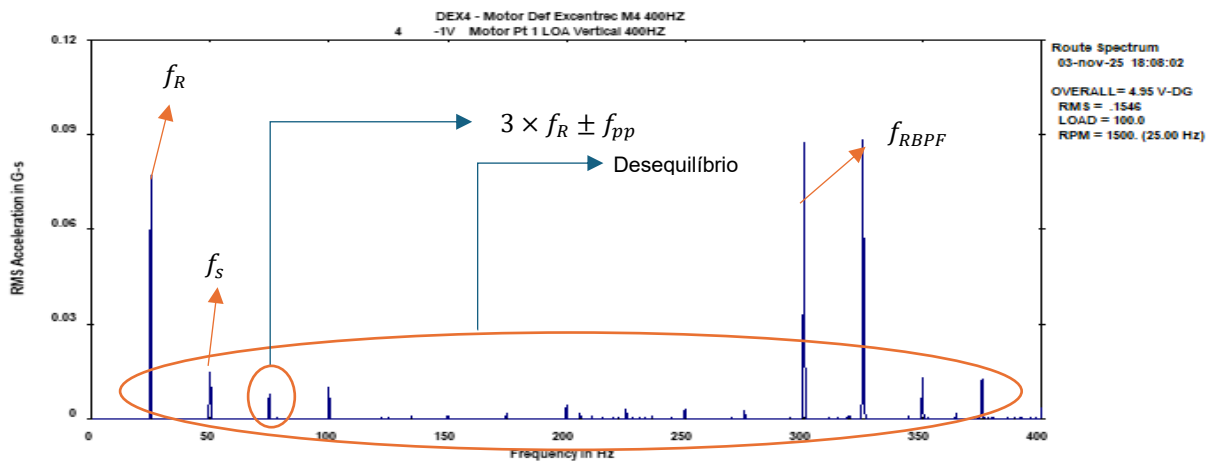


Figura 65 - Espectro de vibrações no eixo vertical do motor B em vazio e com a falha de excentricidade com colocação de uma massa de 45g

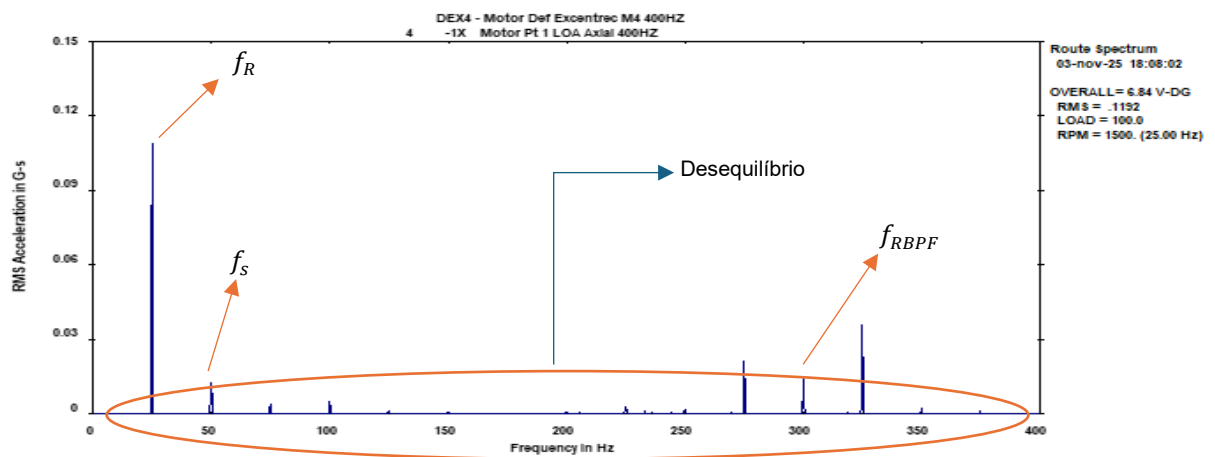


Figura 66 - Espectro de vibrações no eixo axial do motor B em vazio e com a falha de excentricidade com colocação de uma massa de 45g

Analisando os espectros presentes nas Figuras 64, 65 e 66 observa-se a proeminência da f_R , com as respectivas harmônicas, estas indicam a presença de uma falha mecânica, com o diagnóstico de motor a ser “em falha”. A presença de um espectro em f_R tão elevado é uma característica muito comum em casos de desequilíbrio mecânico. A justificção é a presença de uma distribuição desigual de massa no rotor do motor. A cada rotação, essa massa desequilibrada cria uma força centrífuga que resulta numa vibração elevada na frequência de rotação do eixo. Nos eixos radiais na frequência de $3 \times f_R$ consegue-se observar duas bandas laterais muito pequenas com a frequência $\pm f_{pp}$, o que nos diz que estamos perante uma falha mínima de excentricidade do rotor.

A Figura 67 apresenta um gráfico 3D das vibrações nas três direções onde é possível observar o padrão realizado pelas mesmas assim como onde existe maior incidência. Por fim, a Figura 68 apresenta os gráficos 2D numa tentativa de simplificar e organizar a informação presente no gráfico 3D.

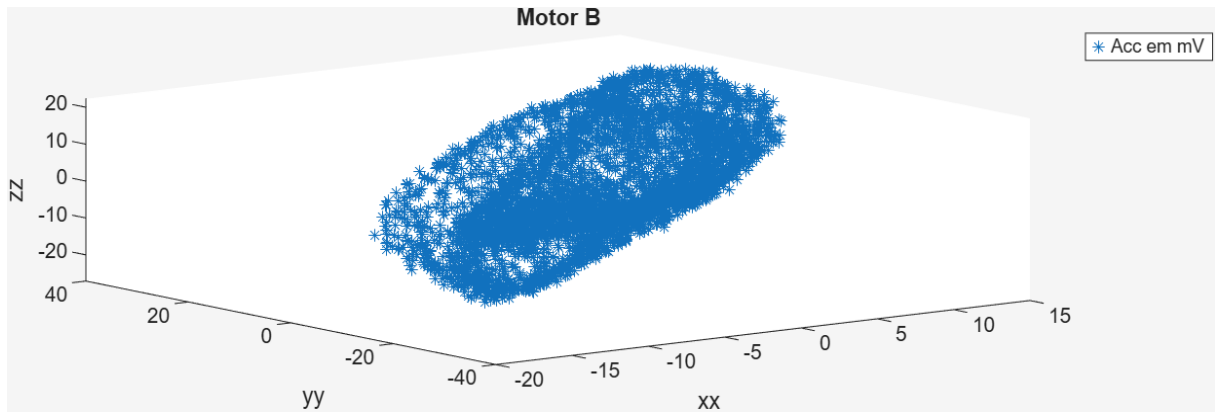


Figura 67 - Gráfico de dispersão de pontos de vibração em mV do motor B com a falha de excentricidade, em vazio segundo os eixos cartesianos X, Y e Z.

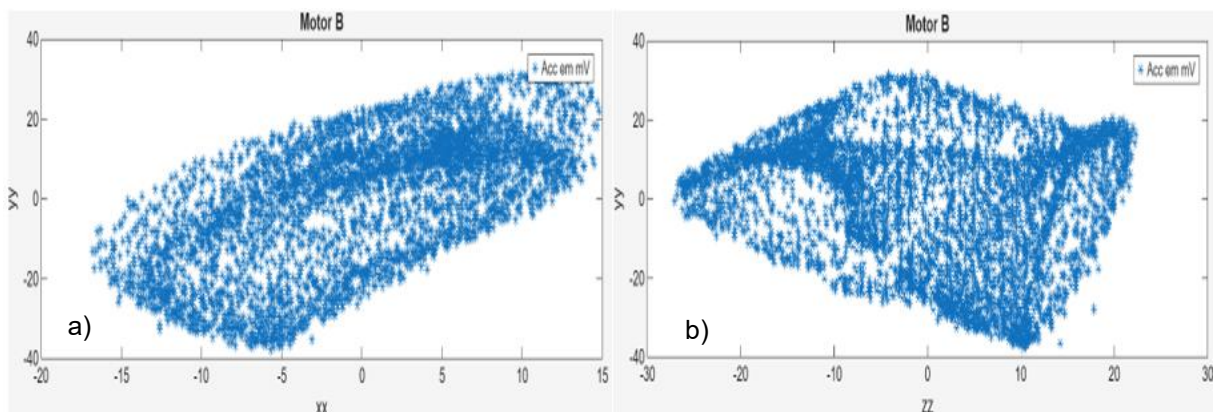


Figura 68 - Gráficos 2D retirados a partir dos valores de vibração em mV recolhidos o gráfico a) apresenta valores dos eixos cartesianos X e Y e b) apresenta valores dos eixos cartesianos Y e Z.

4.2. Análise Crítica do Diagnóstico de Falhas: Eficácia e Limitações

A análise do valor individual de cada eixo é crucial para o diagnóstico correto da falha presente na máquina, pois as falhas geralmente manifestam-se com maior

intensidade em eixos específicos (X, Y ou Z). A apresentação dos gráficos 3D vêm confirmar esta análise feita com a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e permite que seja feita uma análise aos padrões geométricos da dispersão de pontos dados pela amplitude vibracional nas coordenadas cartesianas.

A abordagem de diagnóstico baseada unicamente na análise da amplitude vibracional total apresenta uma eficácia relativa, sendo primariamente útil para um diagnóstico rápido e uma comparação intuitiva do estado do motor. No entanto, possui limitações que impedem um diagnóstico completo, sendo a mais crítica a ineficácia no diagnóstico da causa-raiz, pois, sem o espectro de frequência (FFT), é impossível diferenciar a maioria das falhas. Além disso, esta medição demonstra baixa robustez a variações operacionais, podendo levar a diagnósticos incorretos, e sofre de falta de contexto temporal, perdendo o histórico de degradação essencial para a manutenção preditiva.

Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

A presente dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores especialização em Energias Renováveis e Sistemas de Potência teve como objetivo apresentar e estudar técnicas de detecção e diagnóstico de falhas de máquinas elétricas de indução trifásicas baseado na análise das vibrações produzidas pelas mesmas em diferentes condições de funcionamento. Este estudo abordou três tipos de falhas distintas, nomeadamente, barras de rotor quebradas, curto-circuito entre espiras dos enrolamentos de estator, excentricidade, sendo estas as falhas mais comuns dos motores de indução trifásicos em ambiente industrial. A proposta de detecção e diagnóstico apresentada, baseada na análise de vibrações tridimensional, apresenta uma abordagem diferente da maioria das propostas técnicas de diagnóstico baseadas em vibrações.

Os resultados laboratoriais permitiram a validação dos pressupostos teóricos apresentados. A técnica apresentada faz apenas uso de sensores de vibração, no caso específico deste trabalho foi escolhido um sensor triaxial. Este foi o sensor escolhido pela maior abrangência na coleta de dados, sendo de salientar que para o estudo ser mais conclusivo é necessário um maior universo de amostras para se fazer notar a repetibilidade dos resultados e assim retirar maiores conclusões.

A metodologia proposta, caracterizada pela sua natureza não invasiva, pela abrangência diagnóstica e pela simplicidade, representa uma contribuição significativa para o campo da manutenção preditiva e monitorização de condição de máquinas elétricas rotativas.

5.2. Implicações Práticas e Trabalhos Futuros

Este trabalho sobre a detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos, baseada na análise da representação geométrica, 3D e 2D, da vibração tem implicações práticas significativas na indústria, nomeadamente, nas áreas da Manutenção Preditiva, a Formação e o Controlo de Qualidade.

A principal aplicação industrial é na melhoria dos sistemas de monitorização de estado de condição. Por exemplo, criação de uma biblioteca de padrões de vibração específicos, para as máquinas aplicadas e os seus tipos de falha. Para a formação e desenvolvimento de competências, a visualização gráfica do comportamento das vibrações pode servir de base para formação de técnicos de manutenção. No controlo de qualidade de motores elétricos adquiridos novos ou reparados, a validação pós-reparo. Por exemplo, um motor que vem de uma bobinagem do estator, os dados simulados fornecem um modelo de referência para o estado bom para funcionamento. Se os dados de vibração forem padronizados, podem ser usados como comparação entre os diversos fabricantes e a suscetibilidade de falhas dos seus motores.

Com base nos resultados obtidos, existem vários caminhos de desenvolvimento que podem ser explorados para aprofundar o conhecimento no diagnóstico de falhas em motores elétricos. Em primeiro lugar a realização de estudos onde o motor trabalhe com múltiplas falhas em simultâneo, visando compreender a interação complexa dos seus sinais vibracionais. Em segundo, sugere-se realizar o estudo das avarias simuladas sob carga variável, o que permitiria criar um mapa de severidade de carga específico para cada tipo de falha. Por fim, é crucial efetuar medições de vibração durante os arranques e paragens do motor, para a correta identificação das ressonâncias naturais da estrutura; uma vez identificados, essas vibrações podem ser posteriormente mitigadas ou removidas do espectro de análise, aumentando a precisão do diagnóstico.

Referências Bibliográficas

- [1] M. N. Uddin e Md. M. Rahman, «Online current and vibration signal monitoring based fault detection of bowed rotor induction motor», em *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, Canada: IEEE, set. 2015, pp. 2988–2994. doi: 10.1109/ECCE.2015.7310078.
- [2] Mo-Yuen Chow, «Guest editorial special section on motor fault detection and diagnosis», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, n.º 5, pp. 982–983, out. 2000, doi: 10.1109/TIE.2000.873205.
- [3] J. Ayala, M. Meira, C. Verucchi, G. Bossio, e G. Acosta, «Combined Vibration and Stator Current Techniques for Induction Motors Fault Detection – A Review», em *2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, SAN JUAN, Argentina: IEEE, nov. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/RPIC53795.2021.9648507.
- [4] P. S. Panigrahy e P. Chattopadhyay, «Tri-axial vibration based collective feature analysis for decent fault classification of VFD fed induction motor», *Measurement*, vol. 168, p. 108460, jan. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108460.
- [5] N. Bessous, «Reliability Surveys of Fault Distributions in Rotating Electrical Machines : – Case Study of Fault Detections in IMs –», em *020 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP)*, EL OUED, Algeria: IEEE, mai. 2020, pp. 535–543. doi: 10.1109/CCSSP49278.2020.9151672.
- [6] B. Battulga, M. Faizan Shaikh, J. Wook Chun, S. Bong Park, S. Shim, e S. B. Lee, «MEMS Accelerometer and Hall Sensor-Based Identification of Electrical and Mechanical Defects in Induction Motors and Driven Systems», *IEEE Sensors J.*, vol. 24, n.º 19, pp. 31104–31113, out. 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3447869.
- [7] «WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web».
- [8] S. Gomes, «maquinas eletricas i». [Online]. Disponível em: <https://maquinaseletricas.blogspot.com/2016/03/manutencao-industrial-aula-11-inspecao.html>
- [9] T. Garcia-Calva, D. Morinigo-Sotelo, V. Fernandez-Cavero, e R. Romero-Troncoso, «Early Detection of Faults in Induction Motors—A Review», *Energies*, vol. 15, n.º 21, p. 7855, out. 2022, doi: 10.3390/en15217855.
- [10] P. Melo, «Manutenção e Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos», *Neutro à Terra*, n. n. 15 (2015): Revista TécnicoCientífica (Primeiro Semestre), jun. 2015, doi: 10.26537/NEUTROATERRA.V0I15.426.
- [11] P. Melo, «Manutenção e Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos», *Neutro à Terra*, n. n. 15 (2015): Revista TécnicoCientífica (Primeiro Semestre), jun. 2015, doi: 10.26537/NEUTROATERRA.V0I15.426.
- [12] N. Salgueiro, «Saiba como identificar falhas nos rolamentos». [Online]. Disponível em: <https://www.vicor.pt/saiba-como-identificar-falhas-nos-rolamentos/>

- [13] A. Siddique, G. S. Yadava, e B. Singh, «A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors», *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 20, n.º 1, pp. 106–114, mar. 2005, doi: 10.1109/TEC.2004.837304.
- [14] «WEG, “ Danos em Enrolamentos”», 2012.
- [15] B. Baptista, «Desempenho do motor trifásico em condições especiais de funcionamento», Universidade de Coimbra, 2016.
- [16] S. Nandi, H. A. Toliyat, e X. Li, «Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors— A Review», *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 20, n.º 4, pp. 719–729, dez. 2005, doi: 10.1109/tec.2005.847955.
- [17] H. A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, and H. Meshgin-Kelk, *Electric Machines Modeling, Condition Monitoring and Fault Diagnosis*. CRC Press, 2012.
- [18] A. M. L. D. Q. Flores e J. A. B. Carvalho, «Detecção de Avarias em Motores Assíncronos de Indução», *Neutro à Terra*, n. n. 5 (2010): Revista TécnicoCientífica (Primeiro Semestre), jun. 2010, doi: 10.26537/NEUTROATERRA.V0I5.295.
- [19] R. C. F. Filho, «UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA», 2024.
- [20] E. Hashish, K. Miller, W. Finley, e S. Kreitzer, «Vibration Diagnostic Challenges: Case Studies in Electric Motor Applications», *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 23, n.º 4, pp. 22–34, jul. 2017, doi: 10.1109/mias.2016.2600718.
- [21] D. S. Thomas e B. Weiss, «Maintenance Costs and Advanced Maintenance Techniques: Survey and Analysis», *IJPHM*, vol. 12, n.º 1, abr. 2021, doi: 10.36001/ijphm.2021.v12i1.2883.
- [22] I. U. Hassan, K. Panduru, e J. Walsh, «An In-Depth Study of Vibration Sensors for Condition Monitoring», *Sensors*, vol. 24, n.º 3, p. 740, jan. 2024, doi: 10.3390/s24030740.
- [23] R. N. Dash, S. Sahu, C. Ku. Panigrahi, e B. Subudhi, «Condition monitoring of induction motors: — A review», em *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*, Paralakhemundi, Odisha, India: IEEE, out. 2016, pp. 2006–2011. doi: 10.1109/scopes.2016.7955800.
- [24] H. W. Penrose, *Motor circuit analysis: theory, applications and energy analysis*. Old Saybrook (Connecticut): Success by Design, 2002.
- [25] S. Jokic, N. Cincar, e B. Novakovic, «The analysis of vibration measurement and current signature in motor drive faults detection», em *2018 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo: IEEE, mar. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/infoteh.2018.8345531.
- [26] A. Sinha e D. Das, «Machine Learning-based Explainable Stator Fault Diagnosis in Induction Motor using Vibration Signal», em *2023 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, mai. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/i2mtc53148.2023.10175931.

- [27] Z. Kanovic, D. Matic, Z. Jelcic, M. Rapaic, B. Jakovljevic, e M. Kapetina, «Induction motor broken rotor bar detection using vibration analysis — A case study», em *2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, VALENCIA, Spain: IEEE, ago. 2013, pp. 64–68. doi: 10.1109/demped.2013.6645698.
- [28] X. Liu, J. Hong, K. Zhao, B. Sun, W. Zhang, e J. Jiang, «Vibration Analysis for Fault Diagnosis in Induction Motors Using One-Dimensional Dilated Convolutional Neural Networks», *Machines*, vol. 11, n.º 12, p. 1061, nov. 2023, doi: 10.3390/machines11121061.
- [29] M. Tsytkin, «The Origin of the Electromagnetic Vibration of Induction Motors Operating in Modern Industry: Practical Experience—Analysis and Diagnostics», *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 53, n.º 2, pp. 1669–1676, mar. 2017, doi: 10.1109/tia.2016.2633946.
- [30] G. S. Maruthi e K. Panduranga Vittal, «Electrical Fault Detection in Three Phase Squirrel Cage Induction Motor by Vibration Analysis using MEMS Accelerometer», em *2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, pp. 838–843. doi: 10.1109/peds.2005.1619804.
- [31] Y. Xu *et al.*, «Orthogonal On-Rotor Sensing Vibrations for Condition Monitoring of Rotating Machines», *JDMD*, vol. 1, n.º 1, pp. 29–36, dez. 2021, doi: 10.37965/jdmd.v2i2.47.
- [32] D. Shi, G. Feng, X. Du, Z. Zhou, F. Gu, e A. D. Ball, «The Design and Fabrication of an On-Rotor Sensing Wireless Vibration Node for Motor Condition Monitoring», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1109/tim.2024.3440382.
- [33] A. Bellini, A. Yazidi, F. Filippetti, C. Rossi, e G.-A. Capolino, «High Frequency Resolution Techniques for Rotor Fault Detection of Induction Machines», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, n.º 12, pp. 4200–4209, dez. 2008, doi: 10.1109/tie.2008.2007004.
- [34] J. F. Martins, V. F. Pires, e T. Amaral, «Induction motor fault detection and diagnosis using a current state space pattern recognition», *Pattern Recognition Letters*, vol. 32, n.º 2, pp. 321–328, jan. 2011, doi: 10.1016/j.patrec.2010.09.010.
- [35] M. Samy, A. M. Bassiuny, e A. S. Tolba, «FPGA based Motor Current Signature Analysis for Stator Faults Detection in Three Phase Induction Motor», em *2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, Tenerife, Canary Islands, Spain: IEEE, jul. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/iceccme57830.2023.10252271.
- [36] «Termografía para el mantenimiento de variadores y motores eléctricos», *Revista Electro Industria*, 12 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3002&ni=termografia-para-el-mantenimiento-de-variadores-y-motores-electricos>
- [37] G. Niu, X. Dong, e Y. Chen, «Motor Fault Diagnostics Based on Current Signatures: A Review», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, pp. 1–19, 2023, doi: 10.1109/TIM.2023.3285999.
- [38] A. G. Garcia-Ramirez, L. A. Morales-Hernandez, R. A. Osornio-Rios, A. Garcia-Perez, e R. J. Romero-Troncoso, «Thermographic technique as a complement for MCSA in induction motor fault detection», em *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany: IEEE, set. 2014, pp. 1940–1945. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960449.


- [39] V. Dahifale, M. Keskar, V. Kakyalia, S. Rodge, e G. M. Karve, «Fault Detection of 3 Phase Induction Motor Using Vibration Analysis».
- [40] A. E. Tremli, R. A. Flauzino, R. A. Ramos, e G. C. Brito, «Broken Rotor Bar Fault Detection in Asynchronous Machines Using Vibration Analysis», em *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Atlanta, GA, USA: IEEE, ago. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/pesgm40551.2019.8973827.
- [41] T. C. Anil Kumar, G. Singh, e V. N. A. Naikan, «Effectiveness of vibration and current monitoring in detecting broken rotor bar and bearing faults in an induction motor», em *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, New Delhi: IEEE, mar. 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICPES.2016.7584030.
- [42] T. Ch. A. Kumar, G. Singh, e V. N. A. Naikan, «Broken Rotor Bar Fault Diagnosis in VFD Driven Induction Motors by an Improved Vibration Monitoring Technique», *IJPE*, vol. 13, n.º 1, pp. 87–94, jan. 2017, doi: 10.23940/ijpe.17.01.p7.8794.
- [43] P. C. M. Lamim Filho, R. Pederiva, e J. N. Brito, «Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 42, n.º 1–2, pp. 377–387, jan. 2014, doi: 10.1016/j.ymsp.2013.08.033.
- [44] «tese_Marco Azevedo_2013_acelerómetro».
- [45] «Propriedades de um acelerómetro eletrônico e possibilidades de uso no ensino de mecânica».
- [46] P. Ripka e A. Tipek, *Modern sensors handbook*. em Instrumentation and measurement series. London: ISTE, 2007.
- [47] F. Büsching, U. Kulau, M. Gietzelt, e L. Wolf, «Comparison and validation of capacitive accelerometers for health care applications», *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 106, n.º 2, pp. 79–88, mai. 2012, doi: 10.1016/j.cmpb.2011.10.009.
- [48] I. U. Hassan, K. Panduru, e J. Walsh, «An In-Depth Study of Vibration Sensors for Condition Monitoring», *Sensors*, vol. 24, n.º 3, p. 740, jan. 2024, doi: 10.3390/s24030740.
- [49] «<https://www.dmc.pt/recolha-de-dados-de-vibracoes/>».
- [50] P. A. Delgado-Arredondo *et al.*, «Comparative Study of Time-Frequency Decomposition Techniques for Fault Detection in Induction Motors Using Vibration Analysis during Startup Transient», *Shock and Vibration*, vol. 2015, pp. 1–14, 2015, doi: 10.1155/2015/708034.
- [51] S. S. Roy, S. Chatterjee, R. Barman, S. Roy, e S. Dey, «Bearing Fault Detection in Induction Motors Employing Difference Visibility Graph», em *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India: IEEE, dez. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/PEDES49360.2020.9379635.
- [52] S. Misra *et al.*, «Fault Detection in Induction Motor Using Time Domain and Spectral Imaging-Based Transfer Learning Approach on Vibration Data», *Sensors*, vol. 22, n.º 21, p. 8210, out. 2022, doi: 10.3390/s22218210.

- [53] M. Afshar, M. Heydarzadeh, e B. Akin, «A Comprehensive Investigation of Fault Signatures and Spectrum Analysis of Vibration Signals in Distributed Bearing Faults», *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 61, n.º 1, pp. 515–526, jan. 2025, doi: 10.1109/TIA.2024.3462921.
- [54] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, e G.-A. Capolino, «Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, n.º 12, pp. 4109–4126, dez. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.2007527.
- [55] C. Kral, T. G. Habetler, e R. G. Harley, «Detection of Mechanical Imbalances of Induction Machines Without Spectral Analysis of Time-Domain Signals», *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 40, n.º 4, pp. 1101–1106, jul. 2004, doi: 10.1109/TIA.2004.830762.
- [56] «Processamento e Análise de Sinais de Vibração para a Detecção Falhas de Rolamentos».
- [57] «<https://www.bksv.com/pt/knowledge/blog/vibration/measuring-vibration>».
- [58] M. Hasan, «Performance Comparison of Wavelet and FFT Based Multiuser MIMO OFDM over Wireless Rayleigh Fading Channel», vol. 3, n.º 4, 2012.
- [59] Y.-J. Goh e K.-M. Kim, «Clarke-Park Transformation-Based Input Configuration for CNN Diagnosis of Stator Faults in Three Phase Induction Motors Using Motor Current Signature Analysis», *IEEE Access*, vol. 13, pp. 150505–150516, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3602975.
- [60] M. Afshar, M. Heydarzadeh, e B. Akin, «A Comprehensive Investigation of Fault Signatures and Spectrum Analysis of Vibration Signals in Distributed Bearing Faults», *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 61, n.º 1, pp. 515–526, jan. 2025, doi: 10.1109/TIA.2024.3462921.
- [61] P. A. Delgado-Arredondo *et al.*, «Comparative Study of Time-Frequency Decomposition Techniques for Fault Detection in Induction Motors Using Vibration Analysis during Startup Transient», *Shock and Vibration*, vol. 2015, pp. 1–14, 2015, doi: 10.1155/2015/708034.
- [62] N. Mehala, «Rotor Faults Detection in Induction Motor by Wavelet Analysis», *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2009.
- [63] M. Hasan, «Performance Comparison of Wavelet and FFT Based Multiuser MIMO OFDM over Wireless Rayleigh Fading Channel», vol. 3, n.º 4, 2012.
- [64] M. W. Abitha e V. Rajini, «Park's vector approach for online fault diagnosis of induction motor», em *2013 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES)*, Chennai: IEEE, fev. 2013, pp. 1123–1129. doi: 10.1109/ICICES.2013.6508332.
- [65] I. Yun, H. Kim, J. Lee, e S.-G. Lee, «Inter-Turn Fault Diagnosis of Induction Motors Based on Current Vector Pattern Analysis in Stationary Coordinate Frame», *Applied Sciences*, vol. 15, n.º 15, p. 8414, jul. 2025, doi: 10.3390/app15158414.
- [66] T. Vaimann, A. Kallaste, e A. Kilk, «Using Clarke Vector Approach for Stator Current and Voltage Analysis on Induction Motors with Broken Rotor Bars», *ELEKTRON ELEKTROTECH*, vol. 123, n.º 7, pp. 17–20, set. 2012, doi: 10.5755/j01.eee.123.7.2368.
- [67] A. J. Marques Cardoso, S. M. A. Cruz, e D. S. B. Fonseca, «Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach», *IEEE Trans. On energy Conversion*, vol. 14, n.º 3, pp. 595–598, set. 1999, doi: 10.1109/60.790920.


- [68] B. Asad, T. Vaimann, A. Belahcen, e A. Kallaste, «Broken Rotor Bar Fault Diagnostic of Inverter Fed Induction Motor Using FFT, Hilbert and Park's Vector Approach», em *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli: IEEE, set. 2018, pp. 2352–2358. doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506957.
- [69] H. Nejari e M. E. H. Benbouzid, «Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park's vector pattern learning approach», *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 36, n.º 3, pp. 730–735, jun. 2000, doi: 10.1109/28.845047.
- [70] J. Zhang, N. Zhu, L. Yang, Q. Yao, e Q. Lu, «A Fault Diagnosis Approach for Broken Rotor Bars Based on EMD and Envelope Analysis», *Journal of China University of Mining and Technology*, vol. 17, n.º 2, pp. 205–209, jun. 2007, doi: 10.1016/S1006-1266(07)60073-X.
- [71] P. A. Menezes e H. G. de Moura, «Universidade de Brasília - UnB Faculdade UnB Gama - FGA Curso de Engenharia Automotiva».
- [72] Y.-J. Goh e K.-M. Kim, «Clarke-Park Transformation-Based Input Configuration for CNN Diagnosis of Stator Faults in Three Phase Induction Motors Using Motor Current Signature Analysis», *IEEE Access*, vol. 13, pp. 150505–150516, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3602975.
- [73] S. Usman e Muh. Anhar, «Condition Monitoring for Induction Motor using Wireless Vibration Monitoring System», em *Proceedings of the International Conference on Applied Science and Technology on Engineering Science 2023 (ICAST-ES 2023)*, vol. 230, M. U. H. Al Rasyid e M. R. Mufid, Eds., em *Advances in Engineering Research*, vol. 230. , Dordrecht: Atlantis Press International BV, 2024, pp. 1151–1162. doi: 10.2991/978-94-6463-364-1_105.
- [74] U. Dongare, B. Umre, M. Ballal, e V. Dongare, «Incipient Faults Detection in Induction Motor using MLP-NN and RBF-NN-based Fault Classifier».
- [75] R. Schreiber, P. Fuchs, e I. Jaksch, «The application of various current-sensing devices for induction motor fault diagnostics», em *2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, High Tatras, Slovakia: IEEE, mai. 2016, pp. 663–667. doi: 10.1109/CarpathianCC.2016.7501178.
- [76] P. Salatiel, «Técnicas de diagnóstico de avarias em motores de indução baseadas no quadrado da corrente elétrica estatóricas», Instituto Politécnico de Setúbal, 2019.

Apêndices

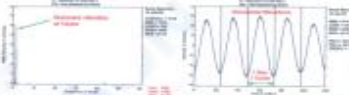
Apêndice I – Guia de Análise de Vibração, EMERSON



VIBRATION ANALYSIS CHART

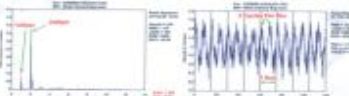


IMBALANCE



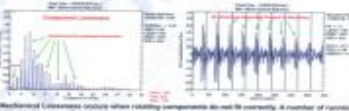
Imbalance occurs when the center of mass differs from the center of rotation, resulting in a heavy spot on a rotor. This heavy spot produces a centrifugal force causing high vibrational amplitudes at a frequency equal to 1X RPM. Imbalance spectra are generally dominated by a dominant amplitude at the base domain. On lightly mounted machines, amplitude will typically be highest in the horizontal direction versus the vertical direction, although light machines can also vibrate in any direction or starting point. The vibration amplitude will increase by the square of speed (after the rotating speed is below the first critical frequency). Typically, vibration will occur between horizontal and vertical readings at each bearing with a pure imbalance problem.

MISALIGNMENT




Misalignment occurs when the shaft centerlines of two directly mating components meet at angles and/or in offset lines and/or neither. Angular misalignment typically produces related axial amplitudes with a phase difference of 180° usually across the frequency spectrum. Offset misalignment typically produces high axial amplitudes with a phase difference of 180° usually across coverage. A misalignment problem will typically produce dominant frequencies at 1X RPM and 2X RPM depending upon the degree of angular misalignment versus shaft misalignment, as well as the type and design of the coupling. In situations with torque distortions, due to a misalignment condition, phase coverage can be essential to distinguish from an imbalance problem. Vibration typically shows repetitive, periodic behavior with one or two distinct peak shaft rotation.

LOOSENESS (Structural Components)




Structural looseness occurs when rotating components do not fit correctly. A number of rotating speed harmonics will dominate spectral data. In 1X RPM, it can be broken down into stages of identification, speed at base may also show sub-harmonic multiples of 1X RPM. Vibration typically shows high resonant frequency peaks, also in some instances low frequency may appear. Structural looseness in the result of stress or distorted structure may lead to fault. Loose foundations, weak grouting, loose bolts or fasteners. These conditions typically produce a frequency of 1X RPM and axial RPM values in spectral data (axial amplitudes may be lower than normal), depending upon the type of structural problem. Resonance data is typically periodic, with one or two cycles per shaft rotation.

BLADE / VANE PASS



Any rotating shaft-hubbed rotor such as axial, gears, air or oil will typically produce an inherent vibration frequency (also potential harmonics) equal to Number of Blades or Vanes x RPM. This inherent vibration frequency is normally referred to as a Blade or Vanes Pass Frequency (BPF or VPF). Excessive BPF or VPF amplitudes may result from rotor or stator distributed gaps between rotating vane and static components. Blade or VPF amplitudes with a typical natural frequency may extremely high deceleration (accelerations will be calculated).

BELTS




The Primary Belt Frequency (PBF) is equal to the number of times per sec (Hz) or rev/min (RPM) that a belt rotates around its pulley system, which can be calculated from the formula above. Belt problems, which produce PBF and harmonics (2X, 3X, 4X, 5X, 6X, 7X, 8X, 9X, 10X), are generally associated with loose belts, worn belts, loose drive and/or driven pulleys, misaligned pulleys, or worn belts. The highest amplitude will typically be related to belt fit and belt hole. Misaligned pulleys normally produce a 1X RPM vibration level.

ROLLING ELEMENT BEARINGS

4 Stages in Rolling Element Bearing Failure:

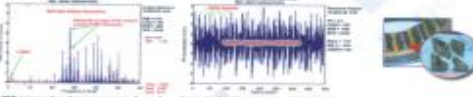
1. Fatigue Pitting (FPF)
2. Spall (S)
3. Flaking (F)
4. Brinell (B)



Cage Defects (FTF)

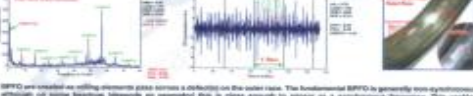
Fundamental cage defect frequencies usually occur between 0.5X-0.6X RPM (sub-synchronous energy). Cage defects can usually be distinguished from other defective bearing conditions, such as ball/roller defects and spalls, and are usually associated with cage failure. Cage defects are usually associated with cage failure. Cage defects are usually associated with cage failure. Cage defects are usually associated with cage failure.

Ball / Roller Defects (BSF)



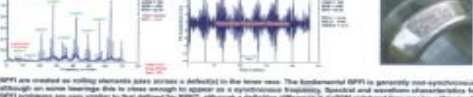
BSF appear when damage occurs to the surface of a bearing's rolling elements. Ball and roller defects are typically non-synchronous frequencies, which can appear at the fundamental BSF or 2X BSF with associated harmonics. They may be larger in amplitude depending upon the number of damaged rolling elements. It is important to use the fundamental BSF or 2X BSF and harmonics associated with cage (FTF) additional frequencies. BSF defects can only be separated from the low resolution where impact equal to the roller/roller frequency may be present.

Outer Race Defects (BPFO)




BPFO are created as rolling elements pass over a defect on the outer race. The fundamental BPFO is generally non-synchronous, although in some bearings depends on geometry. BPFO is often enough to appear as a synchronous frequency. This problem typically shows general features of the fundamental BPFO, which are often higher in amplitude. While the outer race is stable and lower than normal, BPFO frequencies can be indicated by the shaft speed, resulting in BPFO amplitudes exceeding BPFO levels. VPF waveforms typically show distinctive high level peaks (VLF), equal to the fundamental BPFO or related component frequencies.

Inner Race Defects (BPFV)




BPFV are created as rolling elements pass over a defect on the inner race. The fundamental BPFV is generally non-synchronous, although in some bearings it is often enough to appear as a synchronous frequency. Similar and somewhat analogous to BPFO, BPFV problems are very similar to BPFO, although a distinctive difference is VPFV-related frequencies will be higher than normal. The fundamental BPFV (plus fractional Hz modulation by the shaft speed) appears when inner race defects occur. A case per rev evaluation of the time resolution may also occur as a BPFV fault passes through the load zone, making the waveform appear similar to "a cut of a large fault".

SLEEVE BEARINGS



Sleeve bearings will normally exhibit small amplitude forces, such as imbalance, to cause significant vibration amplitudes. Typical rates typically show sub-synchronous frequencies between approximately 1/3 to 1/2 RPM, depending on problem severity, bearing design and application (in some types). Lubrication and resonance may also apply. Mixed mode bearing can cause higher amplitude combined with bearings, and may show a pronounced 1X RPM. Oil whirl occurs when the oil film in a sleeve-bearing system starts a force that pushed the shaft around within the bearing. This problem typically occurs between 0.5X to 0.6X RPM, and may result from improper bearing design, oil viscosity or pressure.

GEAR DEFECTS



Backlash Frequency
No. of Teeth x Shaft Rotating Speed + 1X RPM
This 1X GPM per gear of gears.

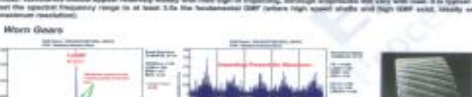
Backlash Freq. will always be present regardless of gear condition. Amplitude may increase due to type of gear condition.

Rollback
Rollback will occur by increasing gear faults, resonance, the speed of shafts to show which shaft the body gear is in.

Normal Gear mesh vibration

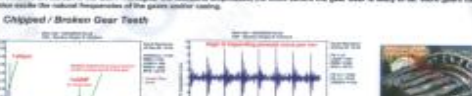
Fundamental gear mesh frequencies (GMF) are calculated by # Gear Teeth x Shaft rpm (apply the same calculation to every shaft in the gear train). However, the fundamental GMF by itself normally represents a problem. GMF by the natural factors of this frequency being present in virtually all gear systems. Changes to fundamental GMF amplitude may typically be the result of varying loads. Vibration should appear relatively evenly with little sign of impacting, although amplitudes will vary with load. It is typical to see the spectral frequency range to at least 3.5X the fundamental GMF where high speed shafts and high GPM exist. Ideally, no resonance reactions.

Worn Gears



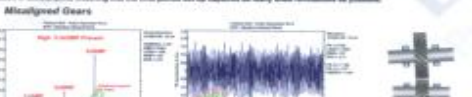
A key characteristic of worn gears is the presence of sidebands, which show up as frequencies equally spaced either side of the GMF or related harmonics. These sideband frequencies will be equal to the rotational speeds of the shaft(s) with the defective gear, or the ratio to the number of shafts comprising the GMF depending upon whether worn gears, but the amplitudes of these sidebands will be higher than normal.

Chipped / Broken Gear Teeth




A key characteristic of worn gears is the presence of sidebands, which show up as frequencies equally spaced either side of the GMF or related harmonics. These sideband frequencies will be equal to the rotational speeds of the shaft(s) with the defective gear, or the ratio to the number of shafts comprising the GMF depending upon whether worn gears, but the amplitudes of these sidebands will be higher than normal.

Aligned Gears



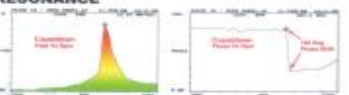
A light chipped or broken gear tooth will produce a 1X RPM vibration. It is difficult to identify this problem using conventional gear data alone, as the characteristic frequency can easily be confused with other problems involving oil film. The best way of identifying this problem is by using the time domain, where a once per revolution (1X RPM) impact will be generated followed by 1/2 gear than the shaft with the defective gear tooth on. Due to the repeating nature of this fault the time resolution is typically seen in synchronization, ensuring that the time period set-up captures as many shaft revolutions as possible.

BEAT VIBRATION




Beats occur when two or three different frequencies are very close to one another causing them to "beat" together. Beats are common when rotational speeds are running close together, such as a 500 RPM motor and a pump set with a 1/2 ratio, when the only difference between them is the number of teeth. The beat frequency is the difference between these primary frequencies. Beats usually occur in vibration amplitudes to increase and decrease to an equally sized degree, and maximum amplitude occurs when beats occur in synchronization. When a beat is present in a bearing it is important to capture a high resolution or time domain to confirm the problem.

RESONANCE



Resonance is a condition where the frequency of an external force coincides with the natural frequency of a system, resulting in excessive (often unwanted) amplitudes. Using resonance analysis a 1X rpm peak can be observed as a specific phenomenon, where BPF will vary and peaks through a resonance. Using 2X-10X magnified views also show resonance responses to be visible. Stable magnified responses are typically more difficult to identify by inspecting a system containing and measuring the resulting frequency response (not magnitude) resulting when resonance occurs, as expected. Vibration resonance is recognized both for immediately higher amplitudes to one or two other orders. Changing a system design, stress an influence will alter the natural frequency, alternatively more significant spreads along from resonance frequency regions. The speed should ideally be 50% higher or lower than the critical speed.

CAVITATION / RECIRCULATION




Occurs when the pressure of fluid drops below the vapor for the nature of the fluid. When a system or installed pressure drops, voids or cavities typically will form in the liquid. These voids, when collapsed, create a high pressure shock wave, which is typically associated with high frequency vibration. Cavitation is typically associated with high frequency vibration, which is typically associated with high frequency vibration. Cavitation is typically associated with high frequency vibration, which is typically associated with high frequency vibration.

ELECTRICAL RELATED FAULTS

GENERALIZED STATOR FAULTS


Presence of low amplitude electricity related the frequency 50 or 60 Hz are not uncommon in vibration data, particularly at 100Hz (2X) and occasionally at 150Hz (3X) (150Hz or 300Hz in some countries). However, when such frequencies occur due to an electrical problem, the amplitude of the peaks will be high. Electrical problems occurring at 2X, 3X, 4X, 5X, 6X, 7X, 8X, 9X, 10X, 11X, 12X, 13X, 14X, 15X, 16X, 17X, 18X, 19X, 20X, 21X, 22X, 23X, 24X, 25X, 26X, 27X, 28X, 29X, 30X, 31X, 32X, 33X, 34X, 35X, 36X, 37X, 38X, 39X, 40X, 41X, 42X, 43X, 44X, 45X, 46X, 47X, 48X, 49X, 50X, 51X, 52X, 53X, 54X, 55X, 56X, 57X, 58X, 59X, 60X, 61X, 62X, 63X, 64X, 65X, 66X, 67X, 68X, 69X, 70X, 71X, 72X, 73X, 74X, 75X, 76X, 77X, 78X, 79X, 80X, 81X, 82X, 83X, 84X, 85X, 86X, 87X, 88X, 89X, 90X, 91X, 92X, 93X, 94X, 95X, 96X, 97X, 98X, 99X, 100X, 101X, 102X, 103X, 104X, 105X, 106X, 107X, 108X, 109X, 110X, 111X, 112X, 113X, 114X, 115X, 116X, 117X, 118X, 119X, 120X, 121X, 122X, 123X, 124X, 125X, 126X, 127X, 128X, 129X, 130X, 131X, 132X, 133X, 134X, 135X, 136X, 137X, 138X, 139X, 140X, 141X, 142X, 143X, 144X, 145X, 146X, 147X, 148X, 149X, 150X, 151X, 152X, 153X, 154X, 155X, 156X, 157X, 158X, 159X, 160X, 161X, 162X, 163X, 164X, 165X, 166X, 167X, 168X, 169X, 170X, 171X, 172X, 173X, 174X, 175X, 176X, 177X, 178X, 179X, 180X, 181X, 182X, 183X, 184X, 185X, 186X, 187X, 188X, 189X, 190X, 191X, 192X, 193X, 194X, 195X, 196X, 197X, 198X, 199X, 200X, 201X, 202X, 203X, 204X, 205X, 206X, 207X, 208X, 209X, 210X, 211X, 212X, 213X, 214X, 215X, 216X, 217X, 218X, 219X, 220X, 221X, 222X, 223X, 224X, 225X, 226X, 227X, 228X, 229X, 230X, 231X, 232X, 233X, 234X, 235X, 236X, 237X, 238X, 239X, 240X, 241X, 242X, 243X, 244X, 245X, 246X, 247X, 248X, 249X, 250X, 251X, 252X, 253X, 254X, 255X, 256X, 257X, 258X, 259X, 260X, 261X, 262X, 263X, 264X, 265X, 266X, 267X, 268X, 269X, 270X, 271X, 272X, 273X, 274X, 275X, 276X, 277X, 278X, 279X, 280X, 281X, 282X, 283X, 284X, 285X, 286X, 287X, 288X, 289X, 290X, 291X, 292X, 293X, 294X, 295X, 296X, 297X, 298X, 299X, 300X, 301X, 302X, 303X, 304X, 305X, 306X, 307X, 308X, 309X, 310X, 311X, 312X, 313X, 314X, 315X, 316X, 317X, 318X, 319X, 320X, 321X, 322X, 323X, 324X, 325X, 326X, 327X, 328X, 329X, 330X, 331X, 332X, 333X, 334X, 335X, 336X, 337X, 338X, 339X, 340X, 341X, 342X, 343X, 344X, 345X, 346X, 347X, 348X, 349X, 350X, 351X, 352X, 353X, 354X, 355X, 356X, 357X, 358X, 359X, 360X, 361X, 362X, 363X, 364X, 365X, 366X, 367X, 368X, 369X, 370X, 371X, 372X, 373X, 374X, 375X, 376X, 377X, 378X, 379X, 380X, 381X, 382X, 383X, 384X, 385X, 386X, 387X, 388X, 389X, 390X, 391X, 392X, 393X, 394X, 395X, 396X, 397X, 398X, 399X, 400X, 401X, 402X, 403X, 404X, 405X, 406X, 407X, 408X, 409X, 410X, 411X, 412X, 413X, 414X, 415X, 416X, 417X, 418X, 419X, 420X, 421X, 422X, 423X, 424X, 425X, 426X, 427X, 428X, 429X, 430X, 431X, 432X, 433X, 434X, 435X, 436X, 437X, 438X, 439X, 440X, 441X, 442X, 443X, 444X, 445X, 446X, 447X, 448X, 449X, 450X, 451X, 452X, 453X, 454X, 455X, 456X, 457X, 458X, 459X, 460X, 461X, 462X, 463X, 464X, 465X, 466X, 467X, 468X, 469X, 470X, 471X, 472X, 473X, 474X, 475X, 476X, 477X, 478X, 479X, 480X, 481X, 482X, 483X, 484X, 485X, 486X, 487X, 488X, 489X, 490X, 491X, 492X, 493X, 494X, 495X, 496X, 497X, 498X, 499X, 500X, 501X, 502X, 503X, 504X, 505X, 506X, 507X, 508X, 509X, 510X, 511X, 512X, 513X, 514X, 515X, 516X, 517X, 518X, 519X, 520X, 521X, 522X, 523X, 524X, 525X, 526X, 527X, 528X, 529X, 530X, 531X, 532X, 533X, 534X, 535X, 536X, 537X, 538X, 539X, 540X, 541X, 542X, 543X, 544X, 545X, 546X, 547X, 548X, 549X, 550X, 551X, 552X, 553X, 554X, 555X, 556X, 557X, 558X, 559X, 560X, 561X, 562X, 563X, 564X, 565X, 566X, 567X, 568X, 569X, 570X, 571X, 572X, 573X, 574X, 575X, 576X, 577X, 578X, 579X, 580X, 581X, 582X, 583X, 584X, 585X, 586X, 587X, 588X, 589X, 590X, 591X, 592X, 593X, 594X, 595X, 596X, 597X, 598X, 599X, 600X, 601X, 602X, 603X, 604X, 605X, 606X, 607X, 608X, 609X, 610X, 611X, 612X, 613X, 614X, 615X, 616X, 617X, 618X, 619X, 620X, 621X, 622X, 623X, 624X, 625X, 626X, 627X, 628X, 629X, 630X, 631X, 632X, 633X, 634X, 635X, 636X, 637X, 638X, 639X, 640X, 641X, 642X, 643X, 644X, 645X, 646X, 647X, 648X, 649X, 650X, 651X, 652X, 653X, 654X, 655X, 656X, 657X, 658X, 659X, 660X, 661X, 662X, 663X, 664X, 665X, 666X, 667X, 668X, 669X, 670X, 671X, 672X, 673X, 674X, 675X, 676X, 677X, 678X, 679X, 680X, 681X, 682X, 683X, 684X, 685X, 686X, 687X, 688X, 689X, 690X, 691X, 692X, 693X, 694X, 695X, 696X, 697X, 698X, 699X, 700X, 701X, 702X, 703X, 704X, 705X, 706X, 707X, 708X, 709X, 710X, 711X, 712X, 713X, 714X, 715X, 716X, 717X, 718X, 719X, 720X, 721X, 722X, 723X, 724X, 725X, 726X, 727X, 728X, 729X, 730X, 731X, 732X, 733X, 734X, 735X, 736X, 737X, 738X, 739X, 740X, 741X, 742X, 743X, 744X, 745X, 746X, 747X, 748X, 749X, 750X, 751X, 752X, 753X, 754X, 755X, 756X, 757X, 758X, 759X, 760X, 761X, 762X, 763X, 764X, 765X, 766X, 767X, 768X, 769X, 770X, 771X, 772X, 773X, 774X, 775X, 776X, 777X, 778X, 779X, 780X, 781X, 782X, 783X, 784X, 785X, 786X, 787X, 788X, 789X, 790X, 791X, 792X, 793X, 794X, 795X, 796X, 797X, 798X, 799X, 800X, 801X, 802X, 803X, 804X, 805X, 806X, 807X, 808X, 809X, 810X, 811X, 812X, 813X, 814X, 815X, 816X, 817X, 818X, 819X, 820X, 821X, 822X, 823X, 824X, 825X, 826X, 827X, 828X, 829X, 830X, 831X, 832X, 833X, 834X, 835X, 836X, 837X, 838X, 839X, 840X, 841X, 842X, 843X, 844X, 845X, 846X, 847X, 848X, 849X, 850X, 851X, 852X, 853X, 854X, 855X, 856X, 857X, 858X, 859X, 860X, 861X, 862X, 863X, 864X, 865X, 866X, 867X, 868X, 869X, 870X, 871X, 872X, 873X, 874X, 875X, 876X, 877X, 878X, 879X, 880X, 881X, 882X, 883X, 884X, 885X, 886X, 887X, 888X, 889X, 890X, 891X, 892X, 893X, 894X, 895X, 896X, 897X, 898X, 899X, 900X, 901X, 902X, 903X, 904X, 905X, 906X, 907X, 908X, 909X, 910X, 911X, 912X, 913X, 914X, 915X, 916X, 917X, 918X, 919X, 920X, 921X, 922X, 923X, 924X, 925X, 926X, 927X, 928X, 929X, 930X, 931X, 932X, 933X, 934X, 935X, 936X, 937X, 938X, 939X, 940X, 941X, 942X, 943X, 944X, 945X, 946X, 947X, 948X, 949X, 950X, 951X, 952X, 953X, 954X, 955X, 956X, 957X, 958X, 959X, 960X, 961X, 962X, 963X, 964X, 965X, 966X, 967X, 968X, 969X, 970X, 971X, 972X, 973X, 974X, 975X, 976X, 977X, 978X, 979X, 980X, 981X, 982X, 983X, 984X, 985X, 986X, 987X, 988X, 989X, 990X, 991X, 992X, 993X, 994X, 995X, 996X, 997X, 998X, 999X, 1000X.

FAULTY SILECON CONTROLLED RECTIFIER (SCR) GANES / SUPPLY



SCRs will inherently generate low amplitude vibration equal to the number of related leads to a 1X rpm cycle. A 1X rpm vibration will occur with SCR's self synchronizing operation. A vibration at 2X, 3X, 4X, 5X, 6X, 7X, 8X, 9X, 10X, 11X, 12X, 13X, 14X, 15X, 16X, 17X, 18X, 19X, 20X, 21X, 22X, 23X, 24X, 25X, 26X, 27X, 28X, 29X, 30X, 31X, 32X, 33X, 34X, 35X, 36X, 37X, 38X, 39X, 40X, 41X, 42X, 43X, 44X, 45X, 46X, 47X, 48X, 49X, 50X, 51X, 52X, 53X, 54X, 55X, 56X, 57X, 58X, 59X, 60X, 61X, 62X, 63X, 64X, 65X, 66X, 67X, 68X, 69X, 70X, 71X, 72X, 73X, 74X, 75X, 76X, 77X, 78X, 79X, 80X, 81X, 82X, 83X, 84X, 85X, 86X, 87X, 88X, 89X, 90X, 91X, 92X, 93X, 94X, 95X, 96X, 97X, 98X, 99X, 100X.

MOTOR DEFECTS



Beats occur when two or three different frequencies are very close to one another causing them to "beat" together. Beats are common when rotational speeds are running close together, such as a 500 RPM motor and a pump set with a 1/2 ratio, when the only difference between them is the number of teeth. The beat frequency is the difference between these primary frequencies. Beats usually occur in vibration amplitudes to increase and decrease to an equally sized degree, and maximum amplitude occurs when beats occur in synchronization. When a beat is present in a bearing it is important to capture a high resolution or time domain to confirm the problem.

Emerson FZE, CSI Tel: +971/4 883 5235 x 145 Fax: +971 4 883 5312

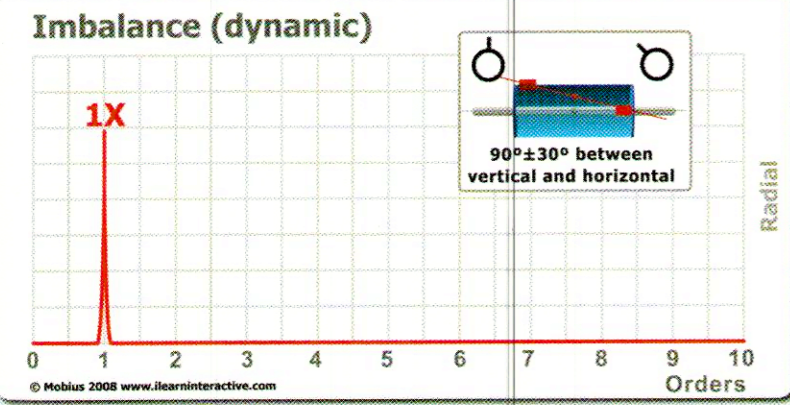
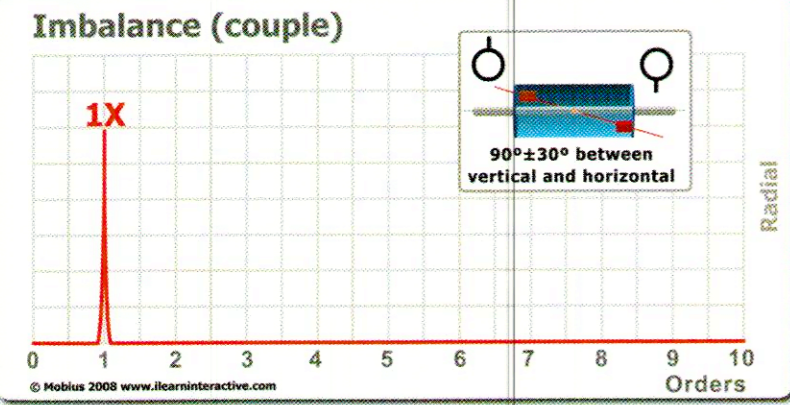
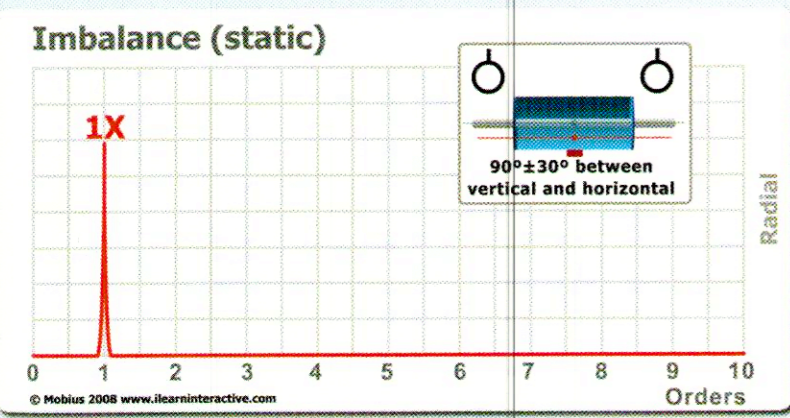
Email: mhtraining_mea@emersonprocess.com Web: www.assetweb.com

© Copyright 2007 Ashfield Measurement Solutions Ltd. All Rights Reserved

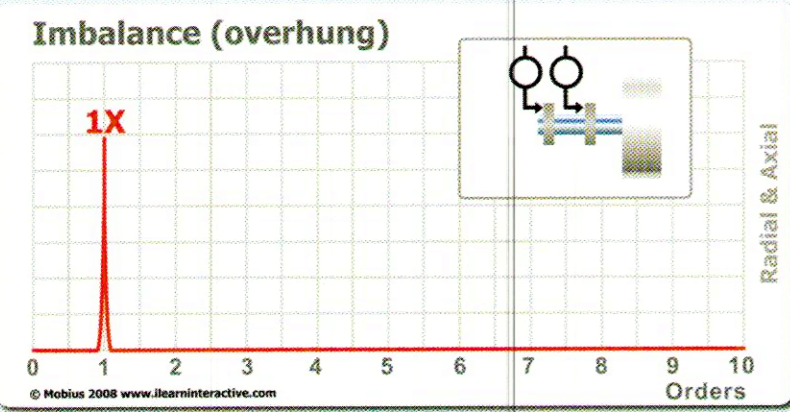
Apêndice II – Guia de Análise de Vibração, MOBIUS

Mobius Institute Diagnostic Chart

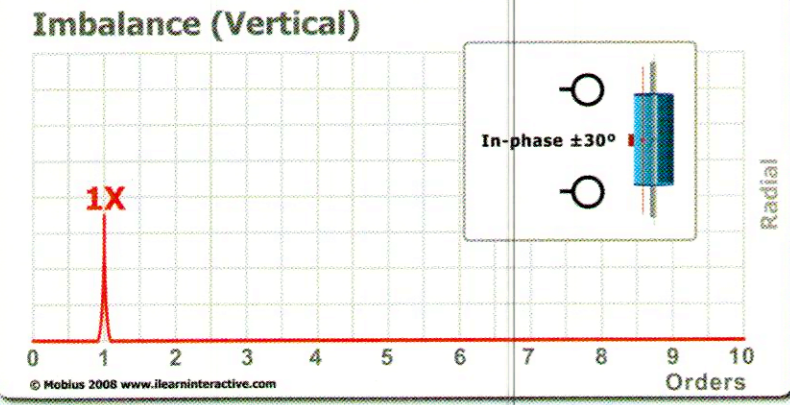
Common spectral fault patterns



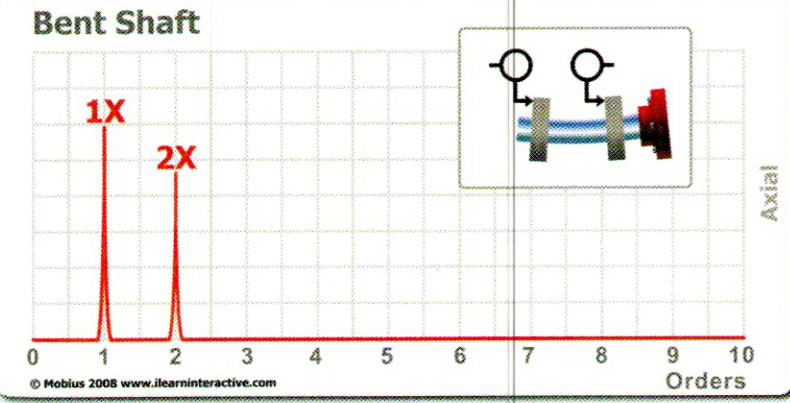
Summary: An unbalanced machine will generate high radial vibration at turning speed (axial will be low). May be due to build-up of material, loss of balance weight, unbalanced coupling, etc.
Spectrum: High peak at 1X (can be confused with other conditions).
Waveform: Mostly sinusoidal (when viewed in velocity).
Phase: 90° shift between V and H. End-to-end: 0° if static, 180° if couple, 0°-180° for dynamic (typical case for wide rotor).



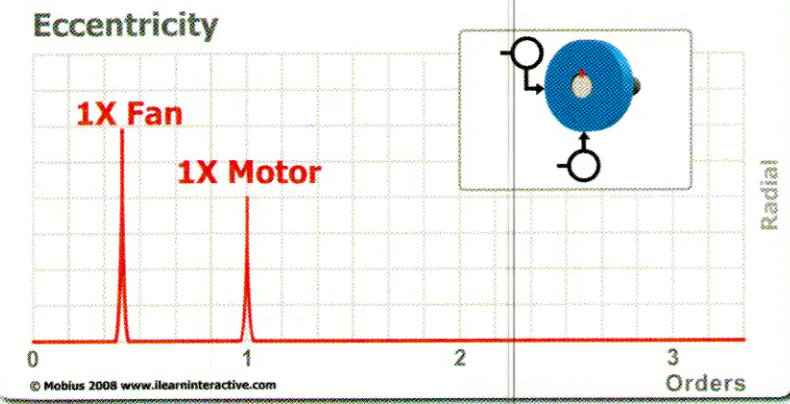
Summary: Overhung machines generate higher vibration in axial.
Spectrum: 1X in radial and axial.
Waveform: Mostly sinusoidal (when viewed in velocity).
Phase: 90° shift between V and H. In-phase in axial (and radial) when measured on both bearings.



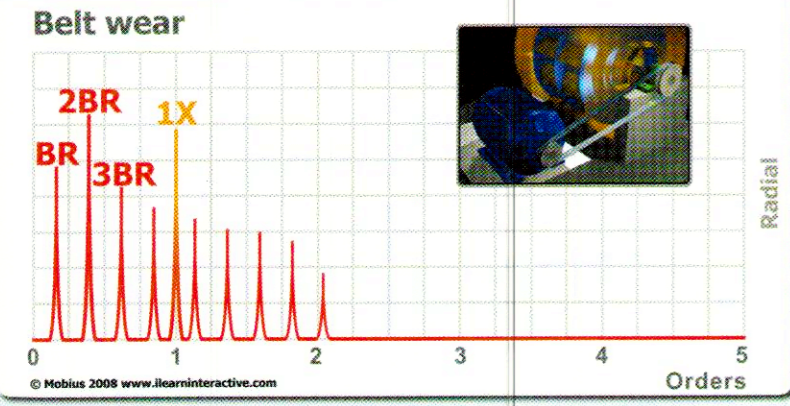
Summary: High vibration in the radial (horizontal) directions.
Spectrum: High peak at 1X.
Waveform: Mostly sinusoidal (when viewed in velocity).
Phase: 90° shift when measured 90° around the machine.



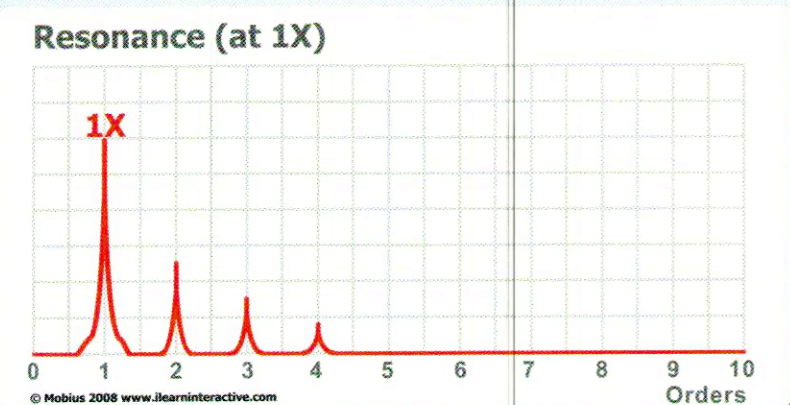
Summary: Bend may be due to thermal bow or physical bend.
Spectrum: High axial 1X and 2X - 2X highest if bent near bearing.
Waveform: Mostly sinusoidal with strong "wobble" if 2X high.
Phase: 180° out-of-phase when measured axially. Face readings in-phase (distinguish from cocked bearing).



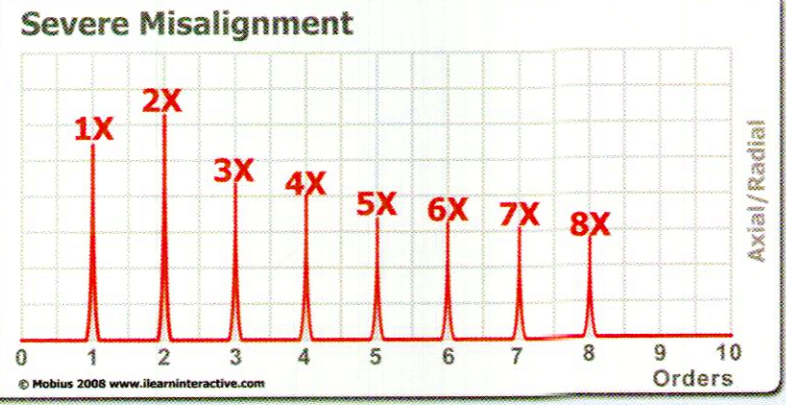
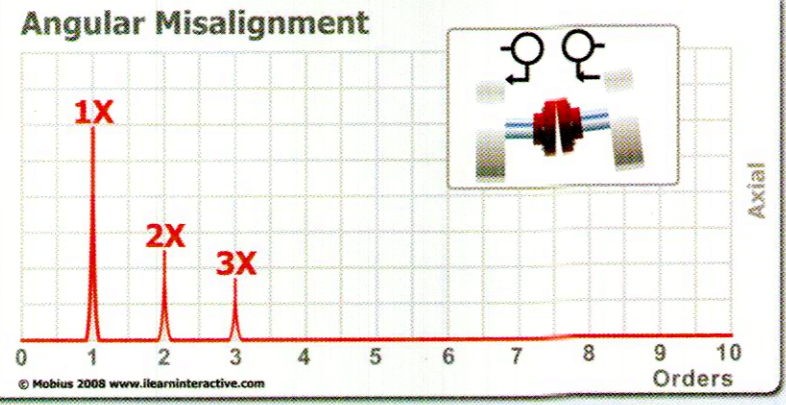
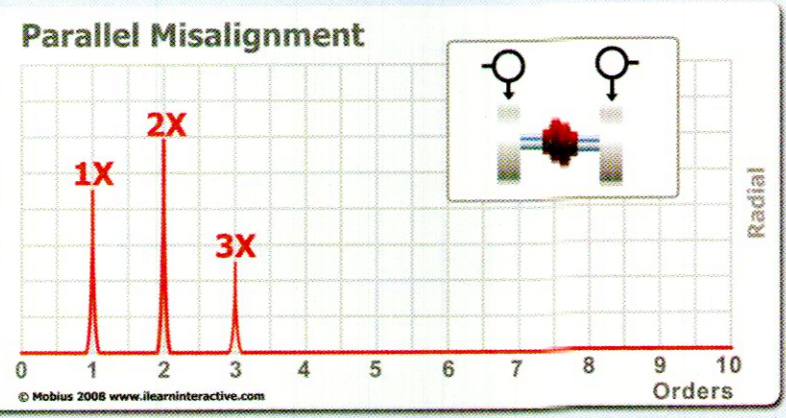
Summary: Sheave/pulley center offset from shaft center.
Spectrum: High peak at 1X of both shafts.
Waveform: Mostly sinusoidal (when viewed in velocity).
Phase: 0° (or 180°) shift between V and H.



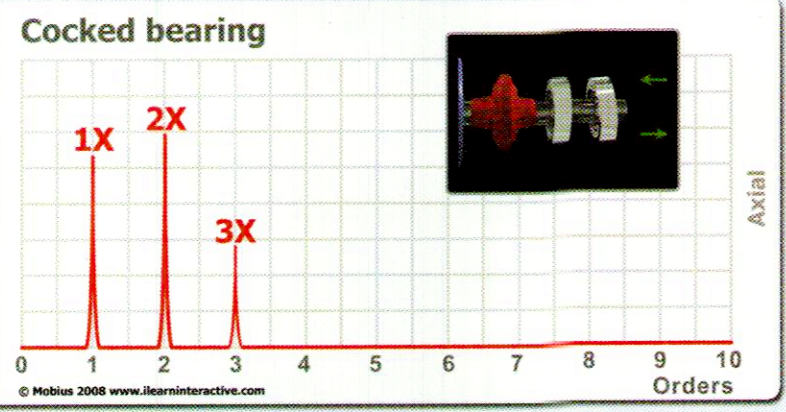
Summary: Worn or loose belts will generate vibration at belt rate.
Spectrum: BR with harmonics (2xBR highest) - sub-synchronous.
Waveform: Depends on wear pattern. May see pulses at BR.
Phase: Not used.



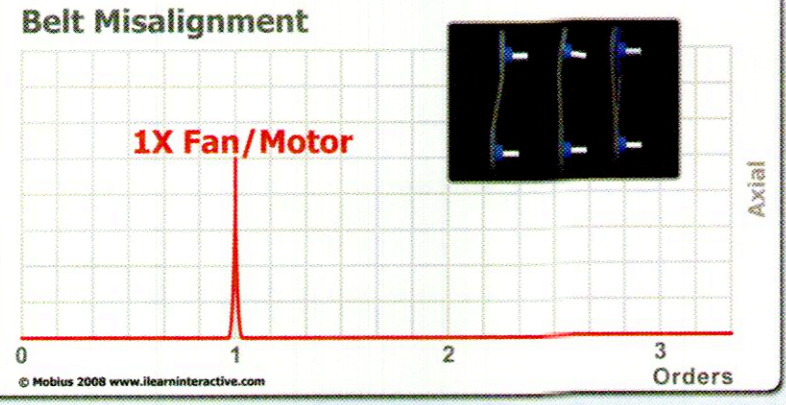
Summary: Resonance is very common in machines, and the structures supporting machines. Resonances amplify vibration at the natural frequency and ~15% either side. If the natural frequency is close to 1X the amplitude at 1X will be high, and the area around the base of the 1X peak will be amplified. Imbalance, misalignment and other conditions will further amplify the vibration. Resonances at other frequencies may be amplified by pump-vane rate, bearing wear and other conditions. Resonances increase vibration levels and reduce machine life.
Spectrum: High peak(s) around the natural frequency, with a raised noise floor within ±15% of the natural frequency.
Phase: Look for mode shapes - swaying, twisting, etc. Use bump, Bodé, runup/coast down, ODS and modal analysis to diagnose fully.



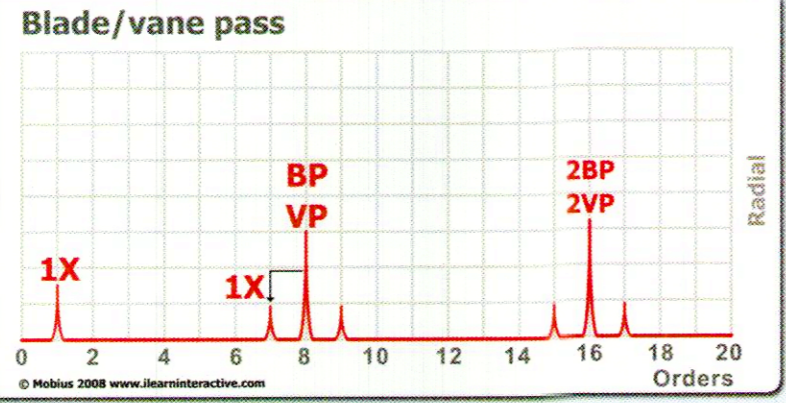
Summary: Misalignment is common due to poor alignment practices or because of thermal growth, shifting foundations, pipe strain, etc.
Spectrum: High peak at 1X and possible peaks at 2X, 3X, 4X → 8X depending on coupling type, severity and other factors. Machine can be misaligned without obvious signs in the spectrum. Higher in axial if angular misalignment, and higher in radial (V&H) if offset misalign.
Waveform: Sinusoidal with a "wobble" if 2X-8X vibration exists.
Phase: 0° or 180° between V and H. Other patterns shown above.



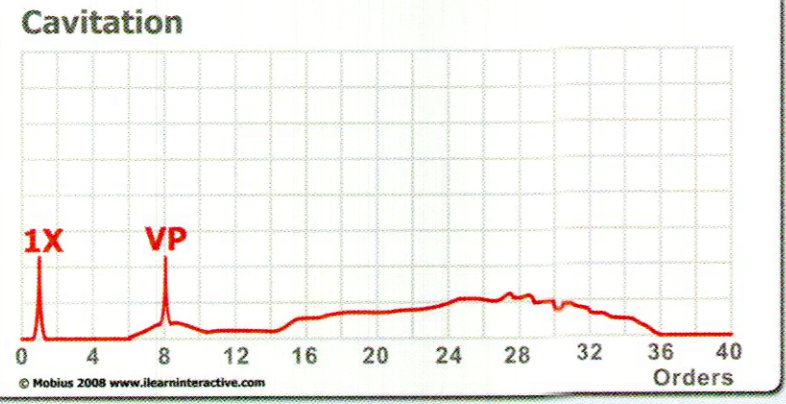
Summary: Inner or outer race may be cocked.
Spectrum: High peaks at 1X, 2X and possibly 3X, 4X.
Waveform: Mostly sinusoidal with "wobble" - phase best diag. tool.
Phase: 180° from one side of the shaft to the other - measured left to right or top to bottom, but not both - due to rocking motion.



Summary: Three forms, shown above, generate axial vibration.
Spectrum: High peak at 1X with small 2X possible.
Waveform: Mostly sinusoidal with a small "wobble".
Phase: 180° when measured in axial direction on each component.



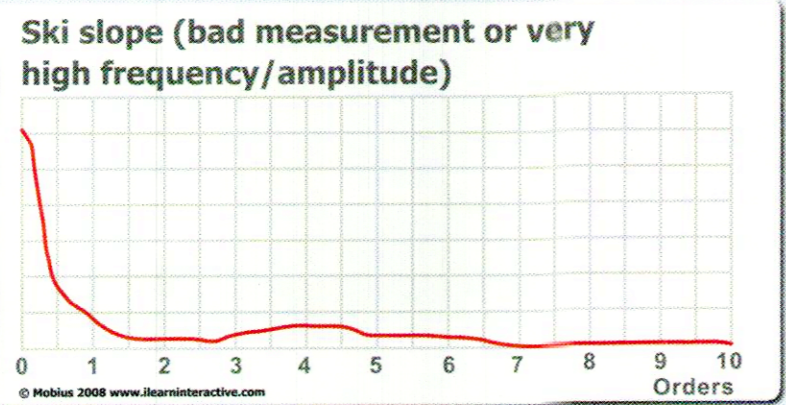
Summary: Blade/vane pass common. Higher levels, harmonics and 1X sidebands indicate hydraulic/aerodynamic fault.
Spectrum: High peak BP or VP - 1X sidebands possible.
Waveform: Pulsations at BP/VP - possible 1X modulation.
Phase: Not useful.



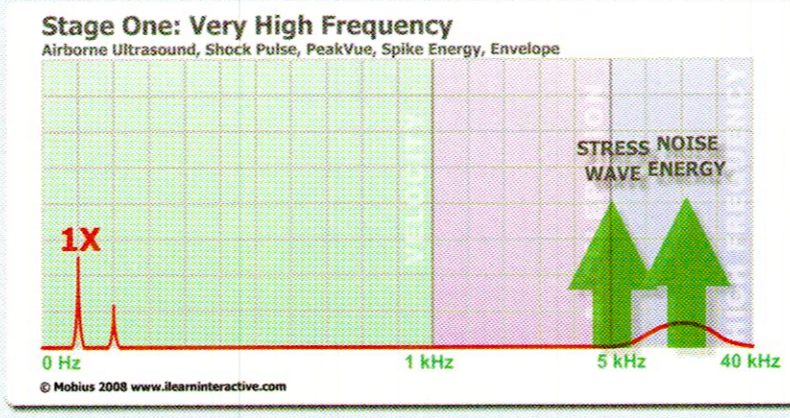
Summary: Cavitation is due to incorrect operating conditions.
Spectrum: Noise floor lifted around VP and at higher frequencies.
Waveform: Non-periodic bursts (also listen for "pumping gravel").
Phase: Not used.



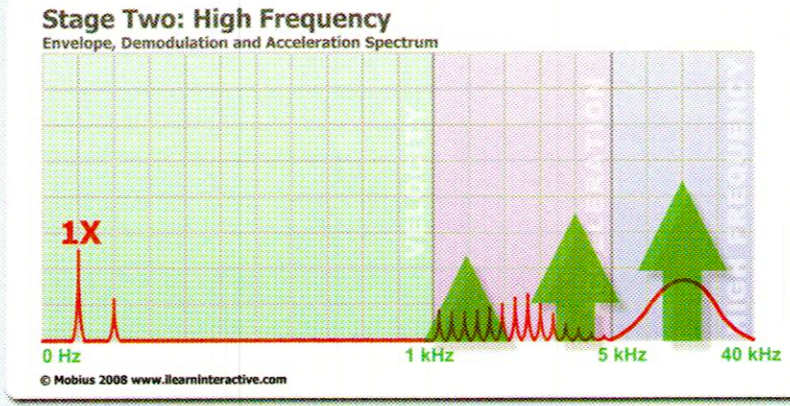
Summary: Turbulence occurs when flow is restricted.
Spectrum: Raised area of "noise" at low frequency.
Waveform: Non-periodic bursts.
Phase: Random phase - not useful.



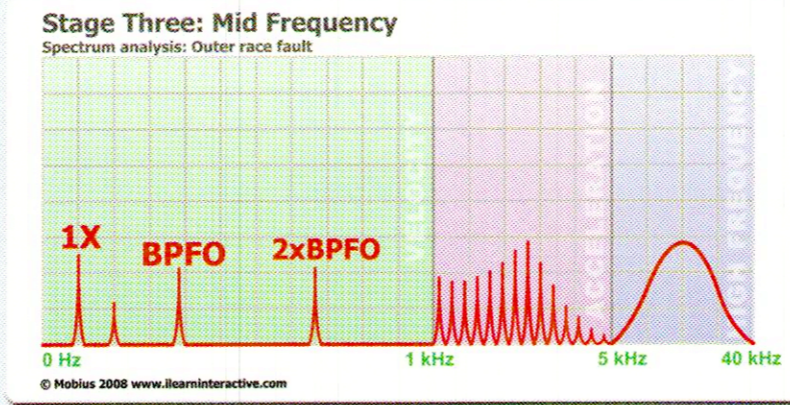
Summary: A ski slope indicates that there is a measurement error. The accelerometer may be damaged; the cable/connectors may be damaged; there may have been a burst of higher frequency vibration (hiss or cavitation) which overloaded the sensor; there may have been a mechanical or thermal shock. Repeat the measurement and correct the root cause.
Spectrum: High at 0 Hz, sloping down at higher frequencies.
Waveform: Can be used to see the event that caused the high amplitude shock, i.e. look for impact, pulse, noise, etc.
Phase: Not used.



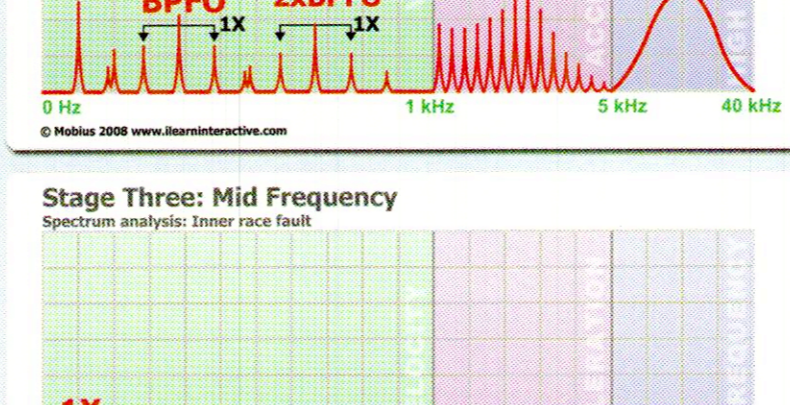
Summary: A stage one bearing fault is minor. There may be sub-surface defects. Check for a lack of lubrication.
Spectrum: The velocity spectrum will not indicate a fault condition.
Waveform: An acceleration waveform may indicate the fault.
HFD: PeakVue™, Shock Pulse™, Spike Energy™ and ultrasonic methods may indicate that a fault exists if the measurement is taken correctly and filter settings are selected correctly (where applicable).
Envelope: May not be effective, depending upon method. Shock waves are very short in duration and can be missed by enveloping.



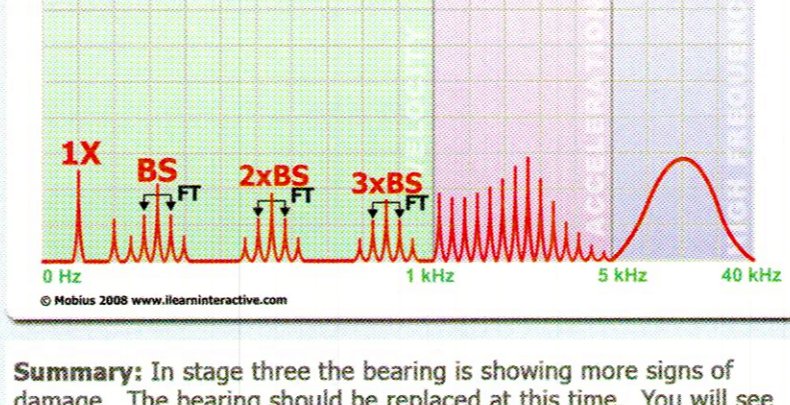
Summary: Damage may be visible to the eye. High frequency detection techniques will trend upwards.
Spectrum: The velocity spectrum may not indicate a fault condition. An acceleration spectrum to a higher fmax will be more effective.
Waveform: The acceleration waveform may show impacts at the period relating to the ball spin, inner race or outer race frequency.
HFD: Very effective. Always mount the sensor correctly.
Envelope: Effective. Peaks, with harmonics, will appear at the ball spin, inner race or outer race frequency.



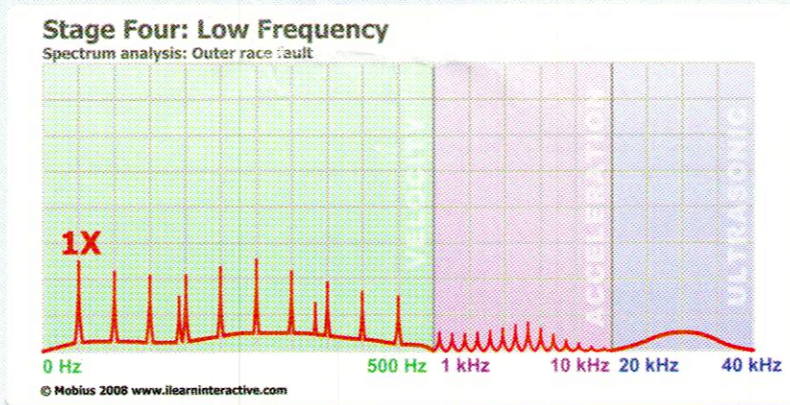
Summary: In stage three the bearing is showing more signs of damage. The bearing should be replaced at this time. You will see harmonics and sidebands in the spectrum.
Spectrum: The velocity spectrum will be effective at this stage. Outer race fault: Harmonics of BPFO, no sidebands. Inner race fault: Harmonics of BPFI, 1X sidebands. Ball/roller fault: Harmonics of BSF, FT (cage rate) sidebands. A: BPFI>BPFO>BSF>1X>FT B: BPFI + BPFO = N, FT~1/2*(1.2/N) BSF~1/2*(N/2)*(1.2/N) BPFO~(N/2)*1.2 BPFI~(N/2)*1.2
Waveform: Impacts and modulation visible.
HFD: Continues to trend upwards. Still effective.
Envelope: Very effective. Look for FT/BSF/BPFI/BPFO and harmonics



Summary: In stage three the bearing is showing more signs of damage. The bearing should be replaced at this time. You will see harmonics and sidebands in the spectrum.
Spectrum: The velocity spectrum will be effective at this stage. Outer race fault: Harmonics of BPFO, no sidebands. Inner race fault: Harmonics of BPFI, 1X sidebands. Ball/roller fault: Harmonics of BSF, FT (cage rate) sidebands. A: BPFI>BPFO>BSF>1X>FT B: BPFI + BPFO = N, FT~1/2*(1.2/N) BSF~1/2*(N/2)*(1.2/N) BPFO~(N/2)*1.2 BPFI~(N/2)*1.2
Waveform: Impacts and modulation visible.
HFD: Continues to trend upwards. Still effective.
Envelope: Very effective. Look for FT/BSF/BPFI/BPFO and harmonics



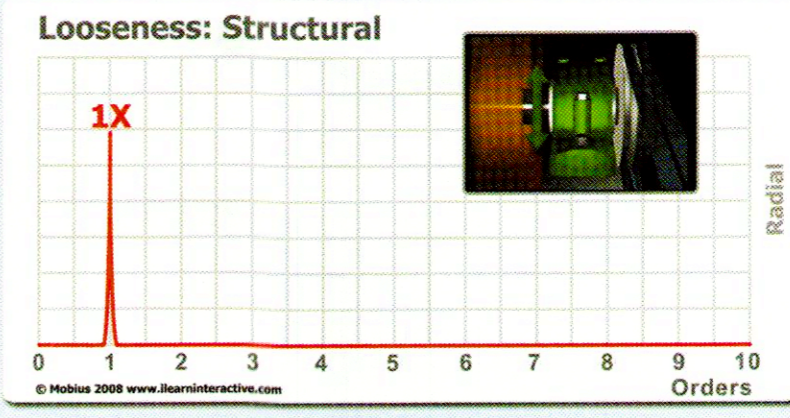
Summary: In stage three the bearing is showing more signs of damage. The bearing should be replaced at this time. You will see harmonics and sidebands in the spectrum.
Spectrum: The velocity spectrum will be effective at this stage. Outer race fault: Harmonics of BPFO, no sidebands. Inner race fault: Harmonics of BPFI, 1X sidebands. Ball/roller fault: Harmonics of BSF, FT (cage rate) sidebands. A: BPFI>BPFO>BSF>1X>FT B: BPFI + BPFO = N, FT~1/2*(1.2/N) BSF~1/2*(N/2)*(1.2/N) BPFO~(N/2)*1.2 BPFI~(N/2)*1.2
Waveform: Impacts and modulation visible.
HFD: Continues to trend upwards. Still effective.
Envelope: Very effective. Look for FT/BSF/BPFI/BPFO and harmonics



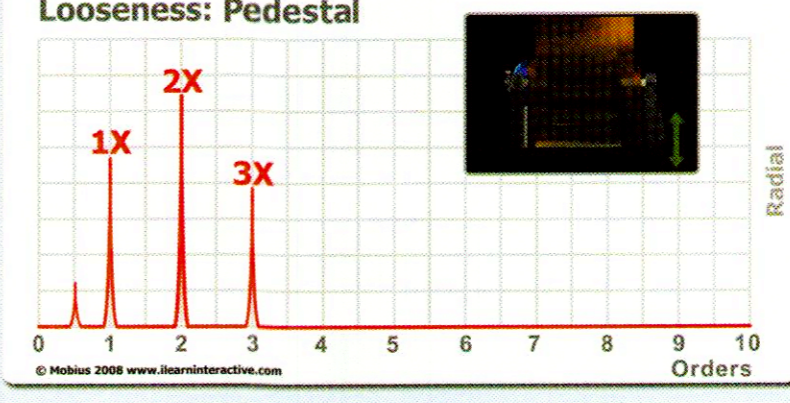
Summary: By stage four the bearing has significant damage - it must be replaced. Methods described for stage three will continue to work until the damage becomes so severe that all periodicity is lost - the key forcing frequencies will no longer be seen as they are replaced by "noise" - especially as metal is lost and clearances are increased - at which time the fault resembles looseness.
Spectrum: Harmonic and sideband patterns replaced by high noise floor and harmonics of 1X (i.e. looseness).
Waveform: Will resemble random noise in latest stage.
HFD: Will trend downwards (with perhaps another increase immediately before failure) because rough edges are worn smooth.
Envelope: Noise floor will rise up and swallow peaks.

IMPORTANT NOTES:

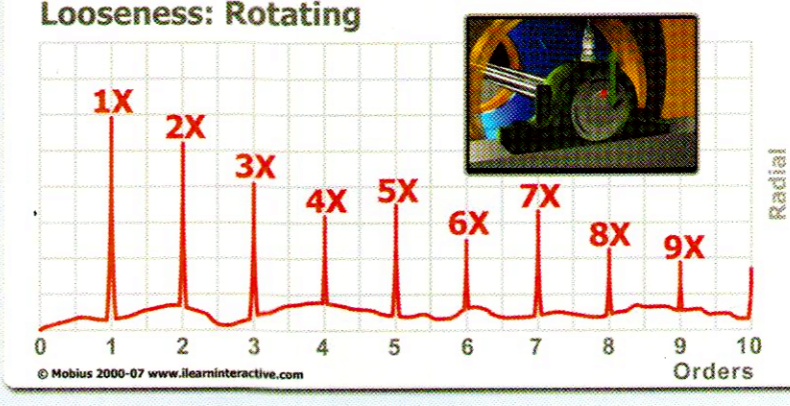
- 1: This chart is meant as a guide only. There is insufficient space to provide a complete description for each possible fault condition.
- 2: The 'X' in '1X', '2X', etc. relates to the turning speed of the shaft. A machine may have multiple shafts that turn at different speeds.
- 3: Phase relationships provided here are not exact. Phase readings may vary plus or minus 30° from the relationship given.
- 4: Phase readings must be corrected for the direction of the sensor.
- 5: Please do not rely on spectra alone. Time waveforms and phase readings provide additional evidence that will ensure accuracy.
- 6: Do not follow this poster blindly. If you do not understand why these patterns exist, or how to take the readings - seek training. Understanding is the key to success.
- 7: Most spectra and waveform patterns described are in velocity.



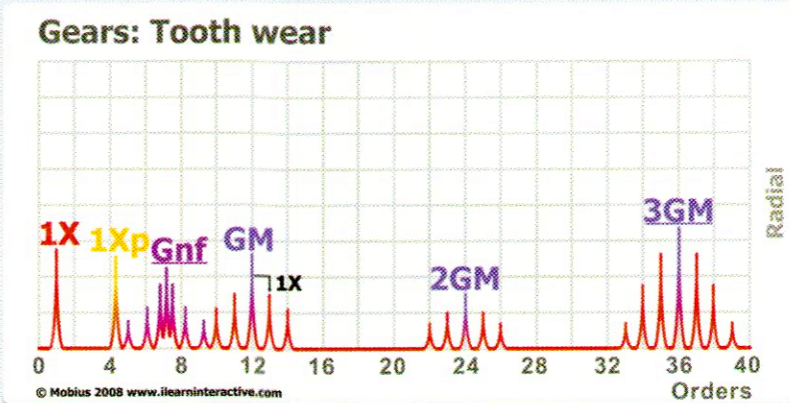
Summary: Looseness/weakness in mounts, baseplate, grout, etc.
Spectrum: High peak at 1X.
Waveform: Mostly sinusoidal (when viewed in velocity).
Phase: Look for 180° difference between solid and loose object.



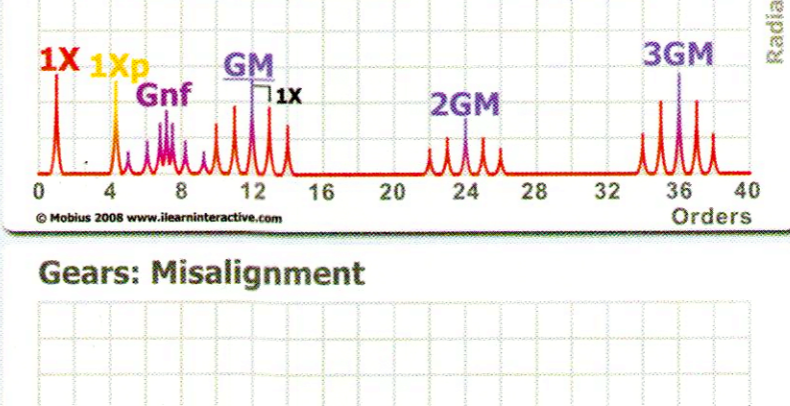
Summary: Loose bolts or cracks in bearing pedestals.
Spectrum: 1X and possibly higher 2X (1/2 or other fractional harmonics may also be present).
Phase: Phase will be erratic and will not follow imbal/misalign rules.



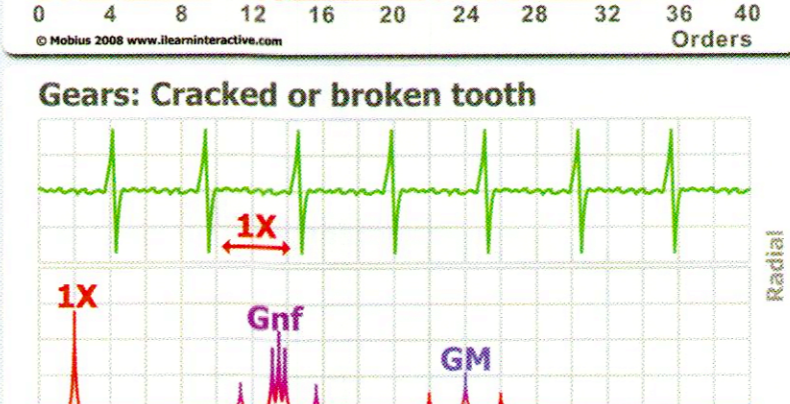
Summary: Bearing loose on shaft or outer race loose.
Spectrum: 1X and many harmonics. Raised noise floor.
Waveform: Random impacting.



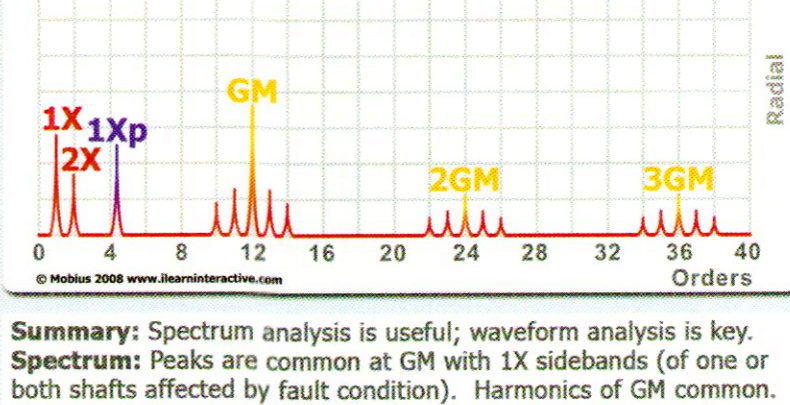
Summary: Uneven gap between rotor and stator that is stationary results in a strong 2xLF vibration where the gap is smallest.
Spectrum: High 2xLF peak - close to 2X or 4X peak if 2 or 4 pole.



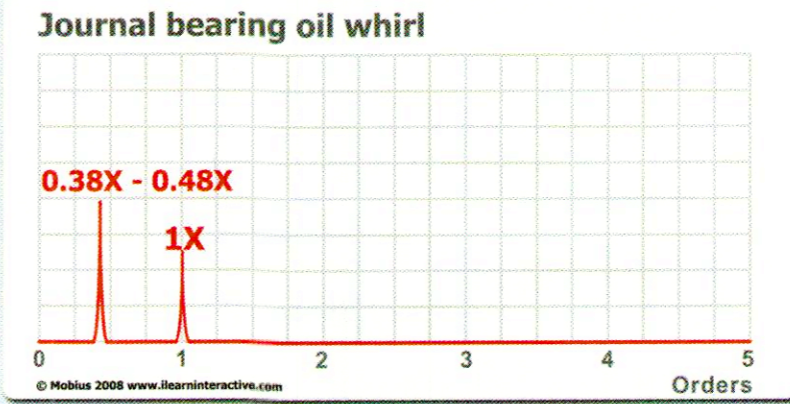
Summary: Uneven gap between rotor and stator that is stationary results in a strong 2xLF vibration where the gap is smallest.
Spectrum: High 2xLF peak - close to 2X or 4X peak if 2 or 4 pole.



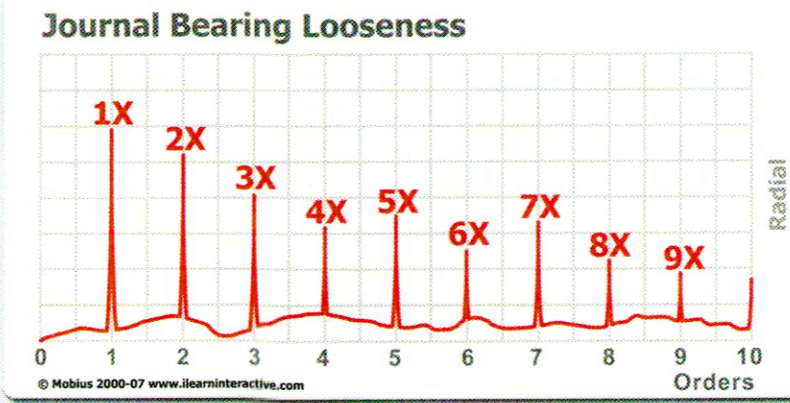
Summary: Spectrum analysis is useful, waveform analysis is key.
Spectrum: Peaks are common at GM with 1X sidebands (of one or both shafts affected by fault condition). Harmonics of GM common. Heights of harmonics and heights/spacing of sidebands are key indicators. Natural frequencies may be excited (1X modulation may occur). Also look for peaks at assembly phase factors.
Waveform: Waveform should be consistent. Look for transients corresponding to number of teeth.
Wear particle analysis: Tests should also be performed to detect particles in the lubricant that indicate excessive wear or damage.



Summary: Spectrum analysis is useful, waveform analysis is key.
Spectrum: Peaks are common at GM with 1X sidebands (of one or both shafts affected by fault condition). Harmonics of GM common. Heights of harmonics and heights/spacing of sidebands are key indicators. Natural frequencies may be excited (1X modulation may occur). Also look for peaks at assembly phase factors.
Waveform: Waveform should be consistent. Look for transients corresponding to number of teeth.
Wear particle analysis: Tests should also be performed to detect particles in the lubricant that indicate excessive wear or damage.

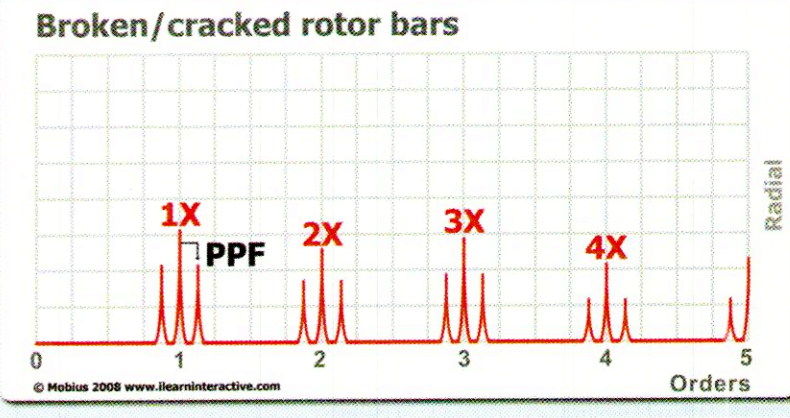


Summary: Oil whirl and oil whip instabilities are very destructive.
Spectrum: Peak at 0.38-0.48X - may be very high amplitude.
Waveform: 1X superimposed on larger oil whirl waveform.

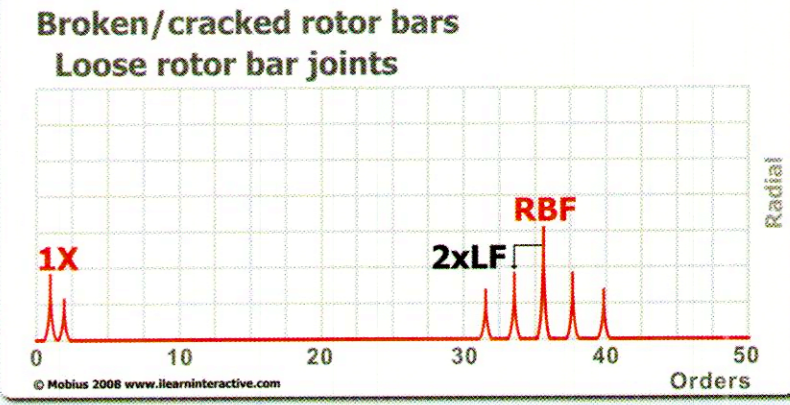


Summary: Looseness similar to rotating looseness - see above.
Spectrum: 1X peak with harmonics; raised noise floor.

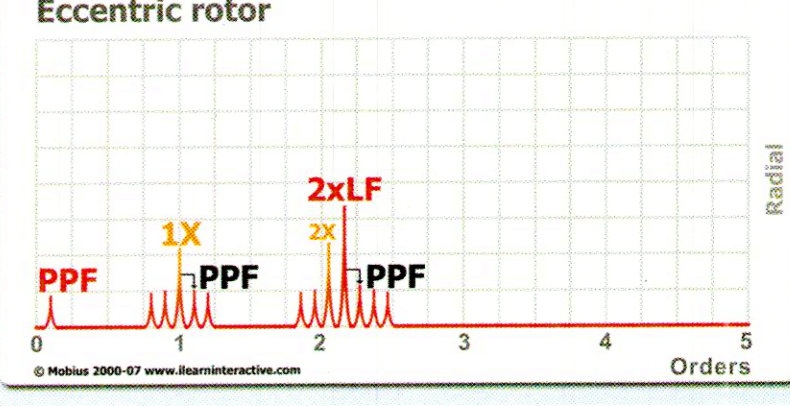
- GM: Gearmesh: # teeth x Turning speed
- G_n: Gear Natural Frequency
- BP: Blade Pass Frequency: # Blades x Turning speed
- VP: Vane Pass Frequency: # Vanes x Turning speed
- BR: Belt Rate Frequency (sub-synchronous)
- FT: Fundamental Train (cage) BSF: Ball Spin N_b: # of elements
- PFI: Ball Pass Frequency Inner Race BPFI: Ball Pass Inner Race



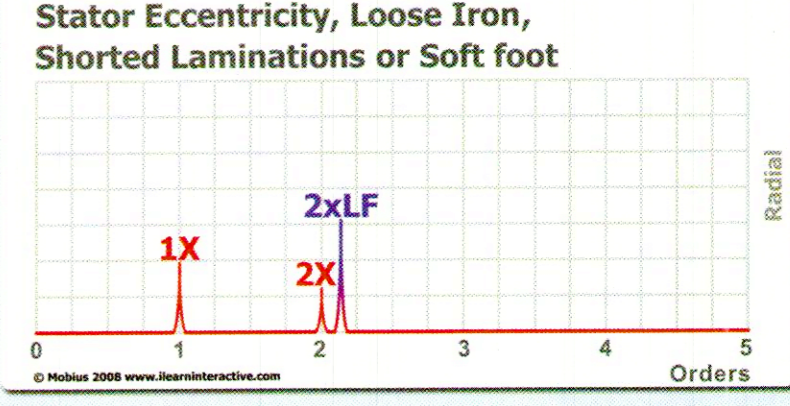
Summary: Rotor faults: Broken or cracked rotor bars; shorted end rings or rotor laminations; or defective or loose rotor bar joints.
Spectrum: 1X harmonics with sidebands of pole pass frequency.



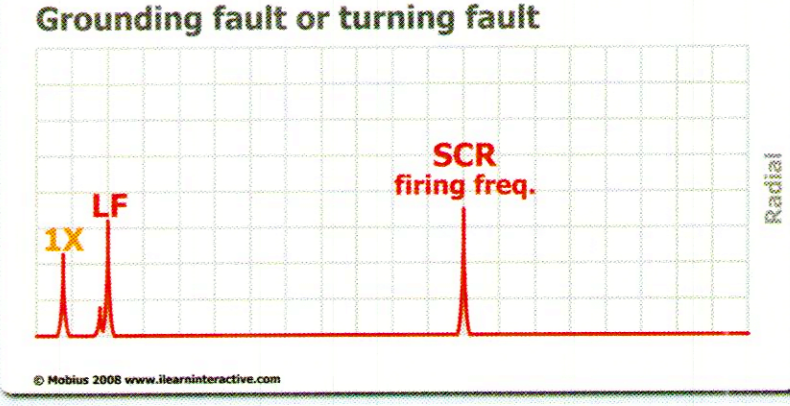
Summary: Peak at RBF is normal. Level is elevated (with 2xLF sidebands) when rotor bars pass a disturbance in the magnetic field (broken or cracked bars, loose rotor bar joints, etc.)
Spectrum: Higher RBF with 2xLF sidebands.
Note: 1X sidebands around RBF indicate rotor eccentricity.



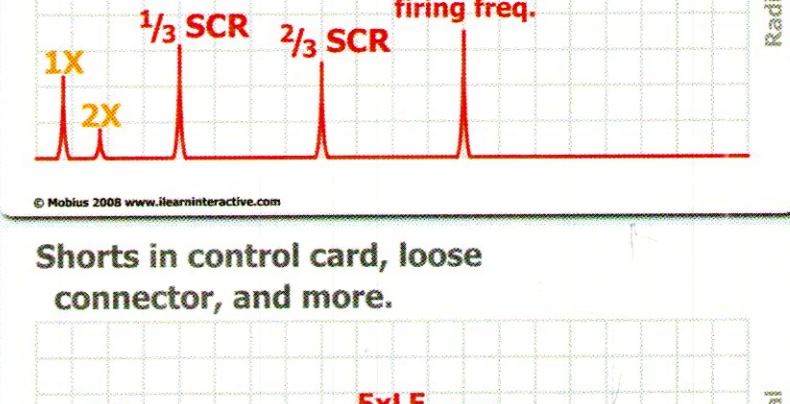
Summary: Uneven gap between rotor and stator that rotates @ 1X results in modulation of the pole passing frequency. High resolution spectra and motor current analysis are required to detect this fault.
Spectrum: 1X and 2xLF with PPF sidebands.



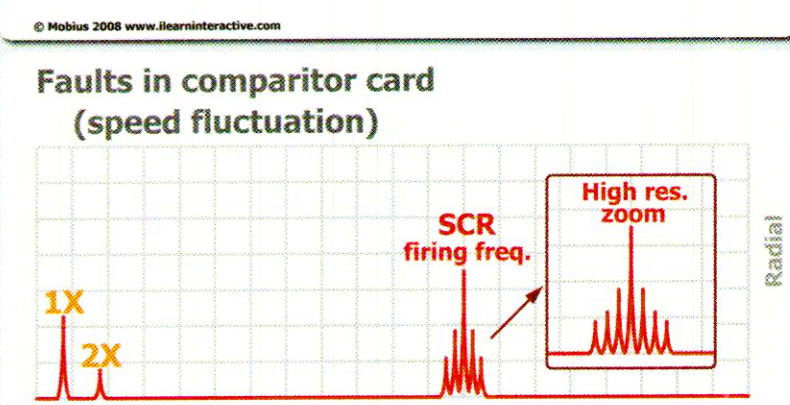
Summary: Uneven gap between rotor and stator that is stationary results in a strong 2xLF vibration where the gap is smallest.
Spectrum: High 2xLF peak - close to 2X or 4X peak if 2 or 4 pole.



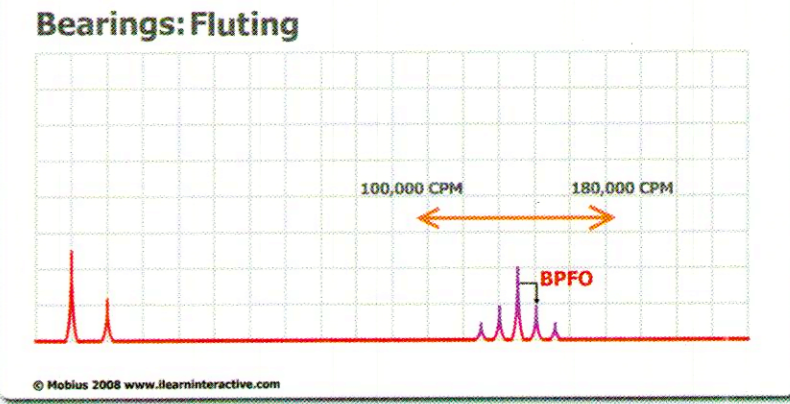
Summary: The DC voltage required to drive DC motors is generated via rectification of the AC line voltage. A peak at LF; increase in amplitude at SCR freq.; harmonics of SCR; peaks at 1/2 and 3/2 SCR; harmonics of LF; and sidebands around SCR all indicate fault conditions.



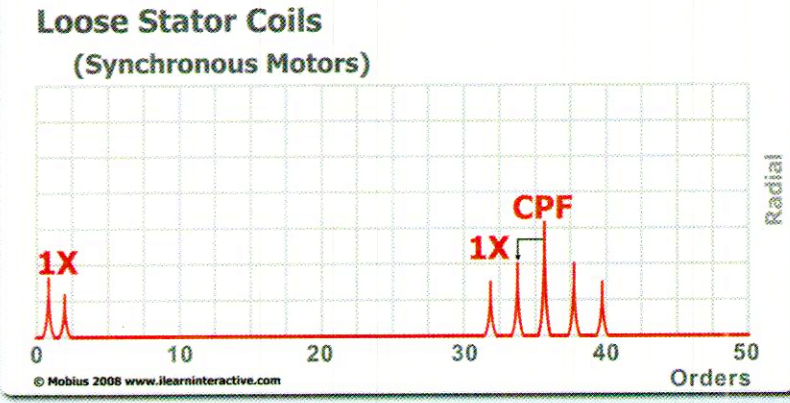
Summary: The DC voltage required to drive DC motors is generated via rectification of the AC line voltage. A peak at LF; increase in amplitude at SCR freq.; harmonics of SCR; peaks at 1/2 and 3/2 SCR; harmonics of LF; and sidebands around SCR all indicate fault conditions.



Summary: The DC voltage required to drive DC motors is generated via rectification of the AC line voltage. A peak at LF; increase in amplitude at SCR freq.; harmonics of SCR; peaks at 1/2 and 3/2 SCR; harmonics of LF; and sidebands around SCR all indicate fault conditions.



Summary: Current passing through the bearings will damage the bearings. The spectrum will have a series of peaks at high frequency separated by BPFO. Common with VFDs as well.



Summary: Loose stator coils will generate a high CPF with 1X sidebands.

- RBF: Rotor Bar Frequency: # Rotor Bars x Turning speed
- PPF: Pole Pass Frequency: # Poles x [Synch speed - Turning speed]
- Snch speed: Synchronous speed: 2xLF = # poles
- LF: Line Frequency: 50 Hz or 60 Hz 2xLF: 100 Hz or 120 Hz
- SCR: Silicon Control Rectifier Frequency: HWR 3xLF or FWR 6xLF
- HWR: Half-Wave Rectified FWR: Full-Wave Rectified
- CPF: Coil Pass Frequency: # Stator Coils x Turning speed

