

Análise e diagnóstico não invasivo de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos

Juan Angel Barreno Barreno

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletromecânica

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António João Marques Cardoso

Co-orientador: Doutor Fernando José Figueiredo Bento

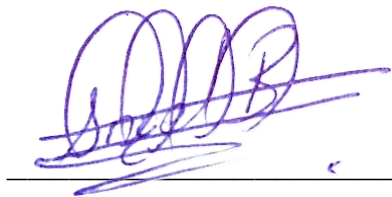
Outubro de 2024

Declaração de Integridade

Eu, Juan Angel Barreno Barreno, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M12427 do curso de Engenharia Eletromecânica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior.**

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 11 /10 /2024

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a horizontal line at the end, positioned above a horizontal line.

Dedicatória

Dedico este trabalho a toda a minha família, começando pelos meus pais, Juan Euclides Barreno Mariño e Gladis Olivia Barreno Valverde, e às minhas duas irmãs, Neiva Barreno e Leonela Barreno. Graças ao apoio incondicional de todos eles, este sonho tornou-se realidade, apesar dos desafios, mas também repleto de momentos gratificantes e boas experiências.

Quero também dedicar este trabalho aos meus sobrinhos, Matías, Iker, Adair e Sebastián, que vêem em mim uma inspiração para seguirem os seus estudos.

Todo o esforço investido neste trabalho e no programa de mestrado é dedicado com todo o meu amor e gratidão à minha querida família.

Agradecimentos

Durante a minha formação académica, tive a oportunidade de adquirir conhecimentos sólidos no fascinante campo da eletromecânica. O meu interesse pelo estudo das máquinas elétricas cresceu a cada aula, motivado pela paixão e pelos conhecimentos que adquiri dos meus professores. Isto levou-me a seguir este caminho de investigação, razão pela qual gostaria de expressar a minha mais profunda gratidão às seguintes pessoas.

Ao Professor Doutor António João Marques Cardoso, por me ter dado a oportunidade de desenvolver o presente tema de investigação, por todos os seus valiosos contributos no âmbito científico, e por me proporcionar as condições e meios necessários para a realização deste trabalho.

Ao Doutor Fernando José Figueiredo Bento, que esteve sempre presente ao longo do desenvolvimento do meu trabalho, com o seu apoio incondicional em cada etapa, e especialmente o seu acompanhamento na parte experimental.

A toda a equipa do CISE - Centro de Investigação em Sistemas Electromecatrónicos, por me terem acolhido e permitido fazer parte da sua equipa de investigação, assim como pelo tempo partilhado no laboratório.

Finalmente, não poderia deixar de mencionar os meus colegas de turma, Estevão Filho, Luan Lang e Leonardo Mbanguine, cuja companhia tornou a minha estadia em Portugal e na universidade ainda mais gratificante.

A todos, o meu mais sincero agradecimento.

Resumo

O presente trabalho de dissertação foca-se no diagnóstico de avarias em rolamentos, componentes mecânicos essenciais nas máquinas elétricas rotativas, destacando-se o motor de indução como uma das máquinas elétricas mais utilizadas a nível industrial devido às suas características operacionais, tais como simplicidade, elevado rendimento e facilidade de manutenção. Nos motores de baixa e média potência, a maior taxa de avarias ocorre nos rolamentos, e para o seu diagnóstico, propõe-se a implementação de métodos não invasivos, onde a corrente elétrica do estator se apresenta como uma das opções mais viáveis.

Para esta análise, foram aplicadas duas técnicas: a *Short-Time Fourier Transform* (STFT) e o *Extended Park's Vector Approach* (EPVA), ambas fundamentadas no domínio da frequência, sendo que a STFT permite, adicionalmente, uma análise no domínio do tempo. Com o objetivo de otimizar os resultados do diagnóstico, propõe-se uma abordagem híbrida que combina as vantagens das duas técnicas, permitindo uma avaliação precisa do comportamento da frequência ao longo do tempo e a identificação do tipo de avaria que afeta o rolamento.

A eficácia destas técnicas, bem como a sua combinação, foi validada através de ensaios num motor de indução trifásico de 2,2 kW, equipado com rolamentos que apresentam avarias típicas, tais como o *pitting*. Os resultados foram satisfatórios, mostrando que cada método foi capaz de detetar sintomas provocados pelas avarias, como o aumento de energia nos primeiros harmónicos e distorções ao longo do tempo nas frequências características do rolamento. Este estudo reforça a importância do diagnóstico não invasivo, que oferece vantagens significativas como simplicidade, baixo custo e utilidade em aplicações de difícil acesso, onde os métodos convencionais de diagnóstico não seriam viáveis.

Palavras-chave

Avarias em rolamentos; Motor de indução trifásico; *Short-Time Fourier Transform* (STFT); *Extended Park's Vector Approach* (EPVA); Correntes elétricas.

Abstract

This dissertation focuses on the diagnosis of bearing failures, essential mechanical components in rotating electrical machines, highlighting the induction motor as one of the most widely used electrical machines at an industrial level due to its operational characteristics, including simplicity, high efficiency, and ease of maintenance. In low and medium power motors, the highest failure rate is found in the bearings, and for their diagnosis, the implementation of non-invasive methods is proposed, where the stator's electric current is presented as one of the most viable options.

For this analysis, two techniques were applied: the *Short-Time Fourier Transform* (STFT) and the *Extended Park's Vector Approach* (EPVA), both based on the frequency domain, with the STFT additionally allowing analysis in the time domain. To optimize the diagnostic results, a hybrid approach is proposed, combining the strengths of both techniques, allowing for an accurate evaluation of frequency behavior over time and the identification of the specific type of fault affecting the bearing.

The effectiveness of these techniques, as well as their combination, was validated through tests on a 2.2 kW three-phase induction motor, equipped with bearings exhibiting typical faults such as pitting. The results were satisfactory, showing that each method successfully detected symptoms caused by the faults, including increased energy in the first harmonics and time-varying distortions in the bearing's characteristic frequencies. This study highlights the importance of non-invasive diagnostics, offering significant advantages such as simplicity, low cost, and applicability in hard-to-reach environments, where conventional diagnostic methods would not be feasible.

Keywords

Bearing faults; Three-phase induction motor; *Short-Time Fourier Transform* (STFT); *Extended Park's Vector Approach* (EPVA); Electrical currents.

Índice

Capítulo 1

Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura da dissertação	5

Capítulo 2

Motor de Indução Trifásico	7
2.1 Estator	8
2.2 Rotor	9
2.2.1 Rotor em gaiola de esquilo	9
2.2.2 Rotor bobinado	10
2.3 Rolamentos	10
2.3.1 Características de um rolamento rígido de esferas	13
2.3.2 Frequências características dos rolamentos	13

Capítulo 3

Avarias nos rolamentos.....	15
3.1 Fadiga	16
3.1.1. Fadiga superficial	16
3.1.2 Fadiga subsuperficial.....	17
3.2 Desgaste	17
3.2.1 Desgaste abrasivo	18
3.2.2 Desgaste adesivo	18
3.3 Corrosão.....	19
3.3.1 Corrosão por humidade	19
3.3.2 Corrosão por atrito.....	20
3.4 Erosão elétrica	21

3.4.1 Tensão elétrica excessiva.....	21
3.4.2 Fuga de corrente	22
3.5 Deformação plástica	22
3.5.1 Sobrecarga	22
3.5.2 Indentações por partículas.....	23
3.6 Fratura e fissura.....	24
3.6.1 Fratura forçada.....	24
3.6.2 Fratura por fadiga	24
3.6.3 Fissura térmica	25
Capítulo 4	
Métodos de Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução	27
4.1 Introdução.....	27
4.2 Métodos de diagnóstico baseados em sinais	28
4.3 Técnicas de Processamento de Sinais	31
4.3.1 Short Time Fourier Transform (STFT)	31
4.3.2 Extended Park’s Vector Approach (EPVA).....	34
4.3.3 Abordagem Híbrida	36
Capítulo 5	
Aquisição de dados experimentais e caracterização das avarias.....	39
5.1 Equipamento.....	39
5.2 Caracterização das avarias nos rolamentos.....	43
Capítulo 6	
Análise e discussão dos resultados	45
6.1 Introdução.....	45
6.2 Análise através da STFT	46
6.2.1 Funcionamento saudável	46
6.2.2 Análise das avarias através da STFT.....	48
6.3 Análise através do método EPVA	54
6.4 Aplicação do método híbrido.....	60

6.5 Discussão dos resultados	66
Capítulo 7	
Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros	71
7.1 Conclusões	71
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	73
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE A	85

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Motor de indução trifásico: (a) Partes constituintes [14]; (b) Motor de indução utilizado nos ensaios experimentais.....	7
Figura 2.2 - Rotor em gaiola de esquilo: (a) Partes constituintes do rotor [17]; (b) Rotor real.	9
Figura 2.3 - Rotor bobinado [18].....	10
Figura 2.4 – Componentes constitutivos de um rolamento rígido de esferas [24].....	11
Figura 2.5 – Elementos constituintes e principais dimensões de um rolamento fixo de esferas - adaptado de [26].	12
Figura 3.1 - Modos de falha em rolamentos - adaptado de [31].....	15
Figura 3.2 – (a) Fragmentação inicial resultante de fadiga iniciada na superfície; (b) Desprendimento subsuperficial inicial no anel interior [32], [31].....	17
Figura 3.3 – (a) Desgaste abrasivo da pista interior do rolamento; (b) Contaminação das pistas do anel exterior de um rolamento de rolos esféricos [31], [36].	19
Figura 3.4 – Corrosão por humidade na pista do anel exterior [31].	19
Figura 3.5 – (a) Corrosão por contato num furo do anel interior, resultante de uma carga pesada ou de um assento do veio inadequado [32]; (b) Falso brinelamento na superfície de uma esfera de rolamento [46].	20
Figura 3.6 – Mecanismo de erosão por tensão elétrica excessiva [32].	21
Figura 3.7 – a) Crateras de 0,5 mm de dimensão [32]; b) Danos na pista interior causada por erosão por fuga de corrente [50].....	22
Figura 3.8 – Anel interno do rolamento radial de esferas [56].....	23
Figura 3.9 – Indentações na superfície da pista do anel interno do rolamento de rolos cónicos [56].	23
Figura 3.10 – Rolamento da caixa de velocidades de uma turbina eólica WECs [59].....	24
Figura 3.11 – Danos na pista exterior do rolamento devido a fissuras térmicas [61].	25
Figura 4.1 – Aspetos intrínsecos ao processo de diagnóstico [5].....	27
Figura 4.2 - Fluxograma para o diagnóstico de avarias em MIs com base no sinal da corrente elétrica, adaptado de [67].	31
Figura 4.3 – Vetor de Park [92].....	34
Figura 4.4 – Diagrama de blocos da abordagem híbrida.	37
Figura 5.1 – Diagrama de blocos do sistema experimental implementado, adaptado de [95].	39
Figura 5.2 – Bancada de ensaios laboratoriais.....	42
Figura 5.3 – Disposição dos rolamentos no MI ensaiado, adaptado de [99].....	43

Figura 5.4 – Avarias 1 e 2 - furo de Ø2 mm na pista exterior nos rolamentos 1 e 2.	44
Figura 5.5 – Avaria 3 - <i>pitting</i> produzido por ED.....	44
Figura 6.1 – STFT para funcionamento saudável: (a) Sem carga; (b) Meia carga; (c) Plena carga.	47
Figura 6.2 – STFT aplicada às correntes de alimentação do MI, considerando estado saudável e furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento SKF 6205-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.	50
Figura 6.3 – STFT aplicada às correntes de alimentação do MI, considerando estado saudável e furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento SKF 6206-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.....	51
Figura 6.4 – STFT aplicada às correntes de alimentação do MI, considerando estado saudável e <i>pitting</i> por ED no rolamento SKF 6205-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.	53
Figura 6.5 – Amplitude da frequência característica da pista externa do rolamento (f_{bor}) em função do nível de carga, através da STFT.....	54
Figura 6.6 – Assinatura do EPVA para o estado saudável e para furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento SKF 6205-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.....	56
Figura 6.7 – Assinatura do EPVA do para o estado saudável e para o furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento SKF 6206-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.....	57
Figura 6.8 – Assinatura do EPVA para a condição saudável e para <i>pitting</i> por ED no rolamento SKF 6205-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.	59
Figura 6.9 – Amplitude da frequência característica da pista externa do rolamento (f_{bor}) em função do nível de carga, por aplicação do método EPVA.....	60
Figura 6.10 – Amplitude da frequência característica da pista interna do rolamento (f_{bir}) em função do nível de carga, por aplicação do método EPVA.....	60
Figura 6.11 – Aplicação do método híbrido às condições de funcionamento saudável e de furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento SKF 6205-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.	62
Figura 6.12 – Aplicação do método híbrido às condições de funcionamento saudável e de furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento SKF 6206-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.	63
Figura 6.13 – Método híbrido aplicado às correntes de alimentação do MI, considerando estado saudável e <i>pitting</i> por ED no rolamento SKF 6205-2Z:(a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.	65

Figura 6.14 – Amplitude da frequência característica da pista externa do rolamento (f_{bor}) em função do nível de carga, por aplicação do método híbrido.....	66
Figura 6.15 – Aumento da amplitude do terceiro e sétimo harmônicos na análise do EPVA.	68
Figura A.1 - Método STFT aplicado às correntes de alimentação do MI para o estado saudável sem carga.....	85
Figura A.2 - Método STFT aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de Ø2mm na pista externa do rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.	85
Figura A.3 - Método STFT aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de Ø2mm na pista externa do rolamento SKF 6206-2Z, sem carga.	86
Figura A.4 - Método STFT aplicado às correntes de alimentação do MI para o <i>pitting</i> por ED no rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.....	86
Figura A.5 - Método EPVA aplicado às correntes de alimentação do MI para o estado saudável sem carga.....	86
Figura A.6 - Método EPVA aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de Ø2mm na pista externa do rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.	87
Figura A.7 - Método EPVA aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de Ø2mm na pista externa do rolamento SKF 6206-2Z, sem carga.	87
Figura A.8 - Método EPVA aplicado às correntes de alimentação do MI para o <i>pitting</i> por ED no rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.....	87
Figura A.9 - Método Híbrido aplicado às correntes de alimentação do MI para o estado saudável sem carga.....	88
Figura A.10 - Método híbrido aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de Ø2mm na pista externa do rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.	88
Figura A.11 - Método híbrido aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de Ø2mm na pista externa do rolamento SKF 6206-2Z, sem carga.....	88
Figura A.12 - Método híbrido aplicado às correntes de alimentação do MI para o <i>pitting</i> por ED no rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.....	89

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Distribuição das avarias das máquinas elétricas em função do nível de tensão de alimentação.	2
Tabela 5.1 - Equipamento de potência e controlo	40
Tabela 5.2 - Instrumentos de medição e aquisição de dados	41
Tabela 5.3 - Sistemas de registo e análise de dados	41
Tabela 5.4 - Conectores e acessórios	42
Tabela 5.5 - Características dos rolamentos SKF 6205-2Z e SKF 6206-2Z.....	43
Tabela 6.1 - Parâmetros e condições de funcionamento dos ensaios experimentais.....	45
Tabela 6.2 – Parâmetros na análise STFT.....	46
Tabela 6.3 – Frequências correspondentes ao rolamento SKF 6205-2Z.....	48
Tabela 6.4 – Frequências correspondentes ao rolamento SKF 6206-2Z.....	48
Tabela 6.5 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente elétrica do estator, para o rolamento SKF 6205-2Z, a meia carga.....	49
Tabela 6.6 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente elétrica do estator, para o rolamento SKF 6206-2Z, a meia carga e plena carga.	51
Tabela 6.7 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente elétrica do estator, para o rolamento SKF 6205-2Z, a meia carga e plena carga, nas pistas exterior e interior.....	52
Tabela 6.8 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA, do rolamento SKF 6205-2Z, a meia e plena carga.	55
Tabela 6.9 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA, associadas ao rolamento SKF 6206-2Z, a meia e plena carga.	57
Tabela 6.10 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA do rolamento SKF 6205-2Z, a meia carga e plena carga.	58
Tabela 6.11 – Frequências correspondentes às componentes espectrais no método híbrido, para o rolamento SKF 6205-2Z, a meia carga e plena carga.....	61
Tabela 6.12 – Frequências correspondentes às componentes espectrais no método híbrido, para o rolamento SKF 6206-2Z, a meia carga e plena carga.	62
Tabela 6.13 – Frequências correspondentes às componentes espectrais no método híbrido, para o rolamento SKF 6205-2Z, a meia carga e plena carga.....	64
Tabela 6.14 – Contribuições de cada método para o diagnóstico de avarias em rolamentos.	67

Lista de Acrónimos

ANFIS	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i> - Sistema de Inferência Neuro-Fuzzy Adaptativo
CFT	<i>Continuous Fourier Transform</i> – Transformada Contínua de Fourier
CISE	Centro de Investigação em Sistemas Electromecatrónicos
ED	<i>Electric Discharge</i> - Descarga Elétrica
EDM	<i>Electric Discharge Machining</i> - Maquinagem por descarga eléctrica
EPVA	<i>Extended Park's Vector Approach</i> – Análise Espectral do Módulo do Vetor de Park
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada Rápida de Fourier
FT	<i>Fourier Transform</i> - Transformada de Fourier
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kW	Kilowatt
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i> - Análise da Assinatura da Corrente do Motor
MI	Motor de Indução
MW	Megawatt
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> - Análise de Componentes Principais
PSD	<i>Power Spectral Density</i> - Densidade Espectral de Potência
SCIM	<i>Three-Phase Squirrel Cage Induction Motor</i> - Motor de Indução Trifásico em Gaiola de Esquilo
STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i> - Transformada de Fourier de Período Curto
UBI	Universidade da Beira Interior
VFD	<i>Variable Frequency Drive</i> – Variador de frequência
WEC	<i>White Etching Cracks</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O desenvolvimento do mundo atual destaca a energia elétrica como um pilar fundamental e essencial da sociedade, completamente imerso no nosso meio, o que realça a grande importância e relevância das máquinas elétricas. Quando mencionamos este fascinante campo das máquinas elétricas, referimo-nos a um vasto espectro de aplicações, presentes em quase todos os processos industriais e de fabrico. As páginas dedicadas a enumerar as aplicações das máquinas elétricas poderiam ser preenchidas com uma variedade de exemplos, desde geradores gigantes (com potências superiores a 500 MW), motores industriais de vários MW, até dispositivos de frações de kW e aplicações aeroespaciais sofisticadas que exigem uma fiabilidade rigorosa no seu funcionamento [1].

De acordo com [2], uma máquina elétrica é definida como um dispositivo que converte energia mecânica em energia elétrica ou energia elétrica em energia mecânica. As máquinas elétricas convertem energia de uma forma para outra, sendo que pelo menos uma delas é elétrica [3]. Assim, a máquina elétrica é designada especificamente como gerador quando transforma energia mecânica em energia elétrica; e como motor, quando converte energia elétrica em energia mecânica. Neste contexto, importa mencionar o transformador, enquanto máquina elétrica estática, que recebe determinados valores de corrente e tensão na sua entrada, e os converte em valores diferentes de corrente e tensão na saída, sendo assim indispensável em vários sistemas de conversão de energia. As máquinas elétricas baseiam-se nos princípios fundamentais da eletricidade e do magnetismo, uma vez que possuem circuitos elétricos e magnéticos interligados, pelo que as principais leis que regem o funcionamento destas máquinas são a lei de Faraday da indução eletromagnética, a segunda equação de Maxwell, a lei de Ampère e a lei de Biot - Savart.

Cada tipo de máquina elétrica é, sem dúvida, de grande importância e relevância, diferindo entre si de acordo com as suas características e aplicação prática. Neste trabalho, iremos focar-nos especificamente no motor de indução (MI), uma vez que, devido às suas características constitutivas e de funcionamento, tem-se destacado entre os motores elétricos, tornando-se o motor com maior presença em processos industriais. Os motores

de indução (MIs) ou motores assíncronos são os motores mais utilizados na indústria. São simples, resistentes, baratos e de fácil manutenção [4]. Como qualquer máquina, equipamento ou componente, seja industrial, doméstico, etc., os MIs estão sujeitos a avarias ao longo da sua vida útil. Sendo os MIs compostos por elementos mecânicos e elétricos, estes equipamentos são indubitavelmente suscetíveis a avarias de natureza múltipla, que têm vindo a ser investigadas e analisadas com interesse crescente. Conforme mencionado em [5], a manutenção inadequada e os defeitos de fabrico são os principais fatores que influenciam a ocorrência de avarias. Relativamente à ocorrência de avarias nos MIs, distinguem-se as avarias relativas às chumaceiras, ao estator, ao rotor, bem como outras avarias que abrangem um conjunto diversificado de manifestações. Para analisar a ocorrência de tais avarias assim identificadas, é apresentada em [6] uma análise completa da distribuição destas avarias em função da potência da máquina elétrica, como mostra a Tabela 1.1. Tais dados são igualmente suportados em [7]. Estes dados indicam que as avarias nas chumaceiras representam a maioria das avarias em motores de baixa e média potência, sendo que essa percentagem diminui à medida que a potência aumenta.

Tabela 1.1 - Distribuição das avarias das máquinas elétricas em função do nível de tensão de alimentação.

Dimensão da máquina	Baixa potência	Média Potência	Alta Potência
Chumaceiras	75%	41%	13%
Estator	9%	37%	66%
Rotor	6%	10%	13%
Outras	10%	12%	8%

Por outro lado, é importante referir os estudos efetuados pelo EPRI e pelo IEEE, que mostram que cerca de 42% das avarias em MIs se devem a avarias nas chumaceiras [8], [9]. As chumaceiras são um dos principais componentes dos MIs trifásicos e, cumulativamente, uma das principais fontes de avarias mecânicas nestes dispositivos eletromecânicos. De facto, a grande maioria delas não atinge o número de horas de trabalho para o qual foram dimensionadas, devido a avarias prematuras induzidas por diferentes razões. Para além da sua representatividade, as avarias nas chumaceiras afiguram-se igualmente críticas pelo facto de as mesmas poderem originar outras avarias dentro do motor [2], [10].

A maior parte das avarias que afetam as chumaceiras comumente utilizadas em máquinas elétricas rotativas é de natureza caracteristicamente mecânica, como desalinhamentos, montagem imprópria dos mancais, problemas de lubrificação ou anomalias nas juntas de vedação usadas em alguns tipos de mancais, constituem, de forma geral, as principais causas de avarias nas chumaceiras [5]. É importante referir que as máquinas elétricas rotativas utilizam diferentes tipos de chumaceiras, como rolamentos de rolos, mancais magnéticos, mancais de ar, entre outros. Neste trabalho, focar-nos-emos especificamente

nas chumaceiras do tipo rolamentos de esferas, pelo que, ao longo do presente trabalho, o termo “rolamentos” será utilizado em referência às chumaceiras.

A avaria destes motores resultará numa paragem não programada, conduzindo a potenciais riscos de segurança e a perdas económicas significativas. Isto levou ao desenvolvimento de métodos de diagnóstico para cada tipo de avaria que este motor pode apresentar. O diagnóstico precoce das avarias dos MIs é, por conseguinte, uma tarefa importante. Atualmente, existem vários métodos disponíveis para o diagnóstico de avarias em rolamentos, mas a grande maioria só obtém resultados eficazes quando são atingidas fases avançadas de degradação dos rolamentos. Para contornar tal lacuna, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar uma abordagem de diagnóstico baseada na monitorização não invasiva da corrente elétrica e da tensão de alimentação do motor, para determinar a presença de avarias incipientes e o seu grau de severidade. A validação das soluções propostas será efetuada através de ensaios laboratoriais.

Assim, este trabalho pretende caracterizar todos os modos de avarias a que os rolamentos de MIs trifásicos estão sujeitos. Tal caracterização permitirá desenvolver um método de diagnóstico capaz de atuar nas fases iniciais da avaria. Desta forma, técnicas de manutenção condicionada podem ser aplicadas através de um correto planeamento de manutenção, otimizando assim a vida útil do equipamento.

1.2 Motivação

Todos os dias se registam avanços contínuos na promoção de novas tecnologias e métodos de diagnóstico na indústria. No contexto específico das máquinas elétricas, este progresso tem dado origem a um vasto campo de estudo e ao desenvolvimento de metodologias que visam contribuir de forma cada vez mais eficaz e eficiente para a monitorização contínua de equipamentos e sistemas. O objetivo primordial é identificar precocemente as eventualidades que possam surgir, ao longo do tempo de funcionamento, garantindo assim um funcionamento contínuo e fiável.

Tal como referido na secção introdutória, o MI trifásico é uma das máquinas elétricas mais utilizadas na indústria, devido à sua robustez e bom desempenho. Portanto, esta máquina torna-se uma das máquinas elétricas rotativas alvo de estudos mais aprofundados. A sua análise tem merecido o foco dos avanços da investigação, uma vez que avarias prematuras de vários tipos têm sido testemunhadas. Os rolamentos, em particular, são os elementos que apresentam a maior probabilidade de avaria nos motores de indução, razão pela qual o interesse em realizar este estudo é de grande importância.

Os rolamentos são um dos elementos mais vitais em qualquer tipo de máquina rotativa. A condição de uma máquina depende da robustez e fiabilidade dos rolamentos, que podem

falhar mesmo durante a fabricação [11]. Outros fatores, como operações contínuas e ambientes operacionais severos, são igualmente promotores de avarias críticas. Estas avarias devem ser evitadas em fases incipientes, para que trabalhos de manutenção adicionais ou efeitos fatais em todo o sistema industrial sejam devidamente mitigados. Portanto, a demanda por estratégias de diagnóstico capazes de atuar nos estágios iniciais das avarias é elevada [12].

Com base na análise da literatura, podemos verificar que existem diferentes tipos de métodos que podem ser aplicados para diagnosticar avarias em rolamentos, sendo a mais comum a análise de vibrações. Apesar da sua representatividade, estes métodos apresentam também lacunas: 1) apenas se obtêm bons resultados em fases avançadas de degradação; 2) a sua aplicação é invasiva, pelo que está limitada a determinadas áreas de trabalho; 3) os custos de implementação são elevados, devido ao equipamento necessário. Por estas razões, a aplicação de um método não invasivo ou minimamente invasivo é mais atrativa e, sobretudo, ajuda a diagnosticar as avarias nas suas fases iniciais.

Identificam-se, seguidamente, os objetivos a atingir com o desenvolvimento do presente trabalho.

1.3 Objetivos

Objetivo principal:

- Identificar e validar experimentalmente os métodos não invasivos mais efetivos para o diagnóstico de avarias em rolamentos de MIs trifásicos.

Objetivos específicos:

- Analisar os modos de avaria em rolamentos de motores de indução trifásicos;
- Gerar uma avaria artificial nos rolamentos de um motor de indução trifásico para posterior análise.
- Avaliar, através de técnicas de processamento de sinal aplicadas às correntes elétricas do estator, as características particulares que estas grandezas apresentam, durante o funcionamento do MI trifásico.
- Aplicar um método de diagnóstico que atinja resultados efetivos nas fases incipientes das avarias, a fim de determinar possíveis causas de avarias.

- Comparar resultados obtidos através da aplicação de diferentes métodos de diagnóstico, validando a sua sensibilidade a diferentes modos de avarias e fases de deterioração dos rolamentos.

1.4 Estrutura da dissertação

O presente trabalho de dissertação encontra-se dividido em 7 capítulos, os quais serão brevemente descritos abaixo:

Introdução

Capítulo 1: Este capítulo apresenta a parte introdutória, expõe a motivação, bem como os objetivos gerais e específicos, e no final dá uma visão geral de cada capítulo que compõe este trabalho. De um modo geral, explica os conceitos básicos relacionados com o tema e a relevância do estudo.

Estado da arte

Capítulo 2: Este capítulo é o primeiro capítulo que faz parte do estado da arte. Expande os conceitos básicos relativos aos MIs trifásicos, onde é dada ênfase à sua importância em contexto industrial e aos principais elementos constituintes dos MIs.

Capítulo 3: Este capítulo complementa o estado da arte, descrevendo os tipos de avarias que comprometem a condição dos rolamentos, categorizando cada uma de acordo com o seu modo de falha.

Métodos e Materiais:

Capítulo 4: Este capítulo apresenta uma visão geral dos métodos de diagnóstico implementados em diversos estudos relacionados com o diagnóstico de avarias em MIs, com especial incidência nos métodos para o diagnóstico de avarias mecânicas. No final, são ampliados os conceitos e as fórmulas intrínsecos aos métodos de análise selecionados para este estudo.

Capítulo 5: Este capítulo descreve os materiais, e todo o equipamento necessário para efetuar os estudos experimentais realizados no âmbito deste trabalho. Descreve, também, os tipos de avarias introduzidas nos rolamentos para posterior análise.

Resultados e conclusões

Capítulo 6: Este capítulo centra-se na análise e discussão dos resultados obtidos através da aplicação do método *Short Time Fourier Transform* (STFT), do método *Extended Park's Vector Approach* (EPVA) e de um método híbrido, resultante da combinação dos métodos STFT e EPVA.

Capítulo 7: Este capítulo apresenta as conclusões do estudo efetuado, onde também se faz referência a trabalhos futuros dentro desta linha de investigação, que procura incorporar novos métodos baseados em novas tecnologias.

Capítulo 2

Motor de Indução Trifásico

O motor de indução (MI), também conhecido como motor assíncrono, é o motor mais frequentemente encontrado na indústria, devido à sua construção simples e robusta, custo reduzido, alto rendimento, bom fator de potência, capacidade de auto-arranque e baixa necessidade de manutenção. De facto, estima-se que mais de 90 % da potência mecânica utilizada na indústria seja fornecida por MIs trifásicos [4], [13]. Relativamente à sua construção, pode ver-se na Figura 2.1 que o MI trifásico é essencialmente constituído por duas partes importantes: o estator e o rotor. Para além disso, está equipado com outros elementos mecânicos necessários ao seu funcionamento, tais como: tampas ou cubos, rolamentos, veio, caixa, ventilador, etc. [3].



Figura 2.1 - Motor de indução trifásico: (a) Partes constituintes [14]; (b) Motor de indução utilizado nos ensaios experimentais.

De todos estes componentes constituintes, é importante aprofundar alguns deles, uma vez que têm vindo a ser efetuados estudos e desenvolvidas técnicas de monitorização do seu estado de funcionamento, visando detetar avarias prematuras e até prever danos futuros na máquina, especialmente no estator, rotor e rolamentos. São estes os elementos mais propensos a apresentar algum tipo de condição de avaria, devido a múltiplas causas que serão analisadas adiante.

2.1 Estator

O estator é a parte estacionária do motor. Esta parte é formada pelo quadro ou carcaça, pelo núcleo e pelo enrolamento estatórico. A carcaça é responsável pela proteção dos componentes internos do motor e, simultaneamente, por suportar o núcleo. O núcleo é constituído por uma pilha de chapas de aço de silício de alta qualidade, de modo a reduzir as perdas por histerese e por correntes de Foucault. O núcleo possui ranhuras na sua periferia interior, onde se encontra alojado o enrolamento trifásico distribuído, alimentado por uma corrente elétrica do mesmo tipo. O enrolamento estatórico é construído por forma a criar um determinado número de polos, sendo o número exato de polos, determinado em função da velocidade requerida. Quando alimentados com correntes elétricas trifásicas, os enrolamentos produzem um fluxo magnético de magnitude constante que gira à velocidade síncrona, definida de acordo com a equação (2.1). Este fluxo magnético rotativo induz uma força eletromotriz (F.E.M.) no rotor, por indução mútua [3], [4], [13], [15].

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

Em que:

n_s : Velocidade síncrona [r/min]

f : Frequência da tensão de alimentação [Hz]

p : Número de polos do motor

Quanto maior for o número de polos magnéticos (sempre um número par), menor será a frequência do campo rotativo e, por conseguinte, menor será a velocidade de sincronismo (n_s). É possível dispor os enrolamentos do estator de modo a obter motores com 2, 4, 6, 8, 10, 12 polos, etc. Normalmente, os motores com mais de 12 polos não são utilizados [16].

2.2 Rotor

O rotor é a parte rotativa do motor e é o elemento que será induzido. No motor de indução, existem 2 tipos de rotor: o rotor em gaiola de esquilo e o rotor bobinado.

2.2.1 Rotor em gaiola de esquilo

Cerca de 90% dos motores de indução aplicados em contexto industrial são deste tipo, por apresentarem a construção mais simples e robusta que se possa imaginar [15]. Utiliza-se o termo Gaiola de Esquilo pois o rotor assemelha-se às gaiolas em que os esquilos brincam em cativeiro [16]. Um rotor de gaiola de esquilo (Figura 2.2) consiste num núcleo cilíndrico laminado que possui ranhuras semifechadas na periferia exterior que podem ter diferentes configurações geométricas, sendo as mais comuns as ranhuras retangulares, circulares, trapezoidais, semicirculares ou elípticas, em forma de lágrima, entre outras. Nestas ranhuras, são colocados barras de cobre ou alumínio (e respetivas ligas), que são curto-circuitados em cada extremidade por anéis de cobre ou alumínio, designados por anéis de curto-circuito. Portanto, nestes rotores, as barras do rotor estão permanentemente curto-circuitadas, não sendo possível adicionar qualquer resistência externa, em série com o circuito do rotor, para ajuste das características de arranque do motor. Para além disso, as ranhuras do rotor não são geralmente paralelas ao veio, sendo-lhes dada uma ligeira inclinação, com o objetivo de fazer com que o motor funcione silenciosamente, reduzindo os harmónicos de ranhura e os binários parasitas, aumentando também a resistência estrutural do rotor. Nos motores de pequeno e médio porte, as barras do rotor e os anéis terminais são feitos de alumínio fundido sob pressão, formando um bloco integral [4], [13], [15].

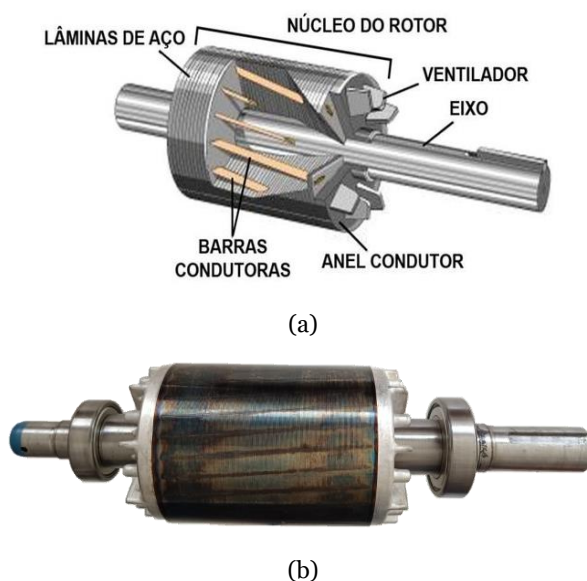


Figura 2.2 - Rotor em gaiola de esquilo: (a) Partes constituintes do rotor [17]; (b) Rotor real.

2.2.2 Rotor bobinado

Este tipo de rotor tem um enrolamento trifásico semelhante ao do estator, e é composto por um grande número de placas metálicas empilhadas e prensadas. O enrolamento rotórico tem o mesmo número de polos que o estator. O número de ranhuras é menor e são utilizadas menos voltas por fase de um condutor com seção superior à do condutor estatórico [1], [13]. O enrolamento é distribuído uniformemente nas ranhuras e é quase sempre ligado em Y (estrela). Os seus três terminais são ligados a anéis coletores isolados, montados no eixo, com escovas assentes sobre eles [15]. Os anéis coletores rotativos e as escovas estacionárias associadas permitem que resistências externas sejam ligadas em série ao enrolamento do rotor. As resistências externas são utilizadas principalmente durante o período de arranque [4]. Em condições normais de funcionamento, os anéis deslizantes são automaticamente colocados em curto-circuito por um colar metálico, que é empurrado ao longo do eixo e liga todos os anéis. As escovas são então automaticamente levantadas dos anéis deslizantes para reduzir as perdas por atrito e o desgaste. Portanto, observa-se que, em condições normais de funcionamento, o rotor bobinado entra em curto-circuito, tal como o rotor em gaiola de esquilo [4], [15]. A Figura 2.3 mostra a configuração deste tipo de rotor, mostrando claramente o enrolamento no rotor e os anéis coletores.



Figura 2.3 - Rotor bobinado [18].

2.3 Rolamentos

Os rolamentos desempenham um papel fundamental nas máquinas elétricas rotativas, ao assegurar o correto alinhamento e posicionamento do rotor em relação ao estator, permitindo a rotação [6]. A sua funcionalidade está diretamente ligada ao desempenho operacional e, conseqüentemente, à fiabilidade e segurança destas máquinas e de todos os sistemas correspondentes [19]. São componentes mecânicos críticos, que permitem o movimento relativo entre sistemas, suportando cargas radiais e de impulso [20]. São fabricados para suportar cargas radiais puras, cargas axiais puras ou uma combinação de ambos os tipos de cargas [21]. Em geral, são constituídos por dois anéis concêntricos - um

exterior e um interior - com esferas ou rolos entre eles. As esferas estão ligadas por uma gaiola que assegura uma distância uniforme entre elas e impede qualquer contacto [22]. Existe no mercado uma grande variedade de rolamentos, sendo cada um deles dimensionado e projetado para diferentes tipos de aplicações. Entre os rolamentos mais utilizados na maioria dos motores e geradores elétricos de média e grande dimensão, o rolamento fixo é um rolamento rígido de esferas, enquanto o rolamento livre é normalmente um rolamento de esferas, um rolamento de rolos cilíndricos ou um rolamento CARB. Os motores mais pequenos, equipados com dois rolamentos rígidos de esferas montados num eixo curto, têm normalmente uma disposição de rolamentos fixos cruzados. O rolamento da extremidade não motriz é o rolamento fixo e é projetado para suportar carga axial [23]. Um rolamento rígido de esferas é composto por quatro partes essenciais: o anel exterior, o anel interior, as esferas ou corpos rolantes e o separador [21]. A Figura 2.4 distingue claramente cada componente básico de um rolamento rígido de esferas.

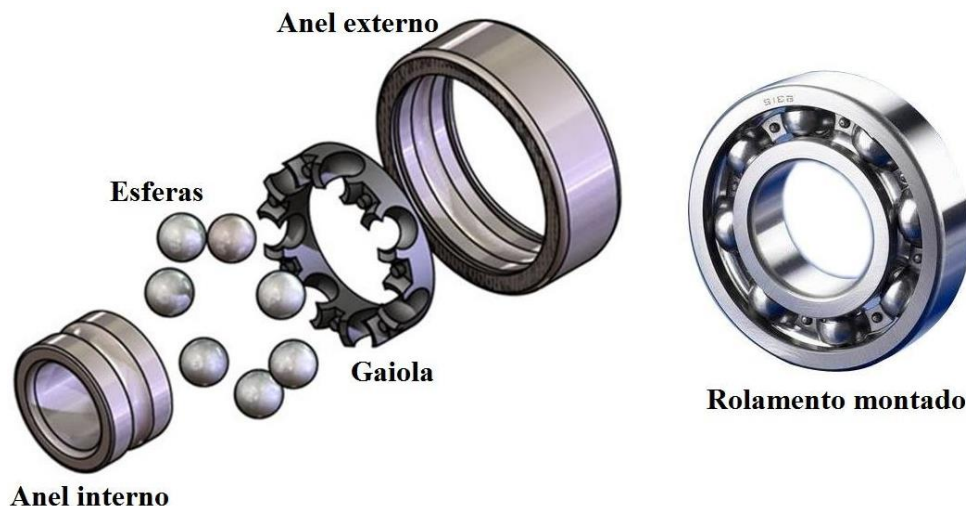


Figura 2.4 – Componentes constitutivos de um rolamento rígido de esferas [24].

Anéis Internos e Externos - Os anéis suportam a pressão que é criada na área de contacto de rolamento de cada anel. O rolamento cíclico excessivo cria fadiga nos anéis quando o rolamento está em funcionamento. Para mitigar estes efeitos, o aço em cada anel deve ser endurecido. O material habitual para os anéis é o 100Cr6, que contém aproximadamente 1 % de carbono e 1,5 % de cromo [25].

Elementos rolantes - Os corpos rolantes, neste caso as esferas, são responsáveis pela transferência das cargas entre os anéis interno e externo. Geralmente são feitos do mesmo material que os anéis de rolamento e, às vezes, se necessário, são feitos de material cerâmico. Os rolamentos com elementos rolantes cerâmicos são considerados rolamentos híbridos e estão a tornar-se cada vez mais comuns [25].

Gaiola - A gaiola nos rolamentos tem várias funções principais, entre as quais a de separar uniformemente os corpos rolantes, otimizando a distribuição da carga e reduzindo o calor de atrito gerado. Além disso, contribuem para guiar os corpos rolantes na zona do rolamento sem carga, para uma melhor lubrificação e para manter os corpos rolantes nos rolamentos de tipo separável quando um anel é retirado durante a montagem e a desmontagem. As gaiolas dos rolamentos rígidos de esferas são centradas, proporcionando uma orientação mais precisa. Estes elementos ajudam ainda a suportar elevadas velocidades, elevados níveis de vibração ou forças de inércia resultantes dos movimentos de todo o rolamento [25].

Dentro da designação dos rolamentos rígidos de esferas, com base na sua codificação, cada rolamento tem as suas dimensões específicas e características distintivas em relação aos outros. Entre o conjunto alargado de informação providenciada pela chapa de características do motor de indução, onde se encontram as especificações técnicas do motor, é indicado o tipo e a disposição dos rolamentos com que o motor elétrico está equipado.

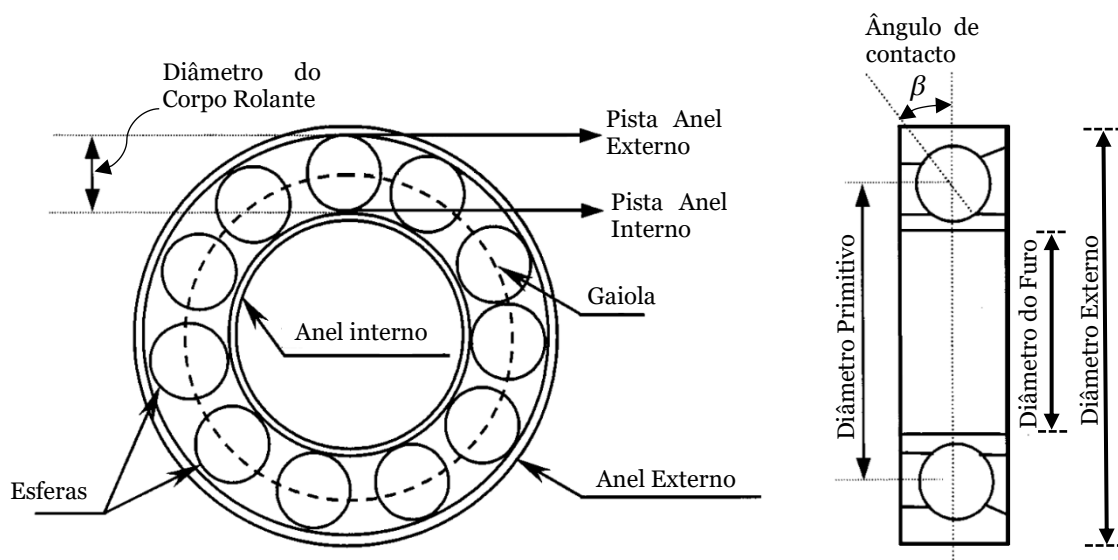


Figura 2.5 – Elementos constituintes e principais dimensões de um rolamento fixo de esferas - adaptado de [26].

A Figura 2.5 mostra as principais dimensões de um rolamento fixo de esferas, que são fornecidas nos catálogos de cada fabricante. Estas características e especificações são muito importantes, pois são padronizadas e, em função das suas medidas e parâmetros, obtêm-se características específicas de cada rolamento, como a frequência de avarias de cada componente do rolamento, que será analisada mais adiante.

2.3.1 Características de um rolamento rígido de esferas

Os rolamentos rígidos de esferas são os rolamentos mais utilizados na indústria e são particularmente versáteis [25]. As características que mais se destacam neste tipo de rolamentos são:

- ✓ Têm uma construção simples.
- ✓ Têm baixo atrito e são otimizados para gerar baixo ruído e baixa vibração.
- ✓ Permitem altas velocidades de rotação.
- ✓ Podem suportar carga radial combinada com carga axial moderada, mas têm uma baixa tolerância ao desalinhamento do eixo.
- ✓ Fáceis de montar.
- ✓ Não requerem uma manutenção muito frequente e complicada.

2.3.2 Frequências características dos rolamentos

Como já foi referido, cada tipo de rolamento tem associadas características geométricas específicas, através das quais podem ser determinadas as quatro frequências características indicativas de avarias do rolamento. Estas avarias são, na sua maioria, de natureza caracteristicamente mecânica e estão principalmente associadas a problemas de desalinhamento, montagem imprópria dos mancais, problemas de lubrificação relativos quer à gripagem dos rolamentos ou à sua lubrificação excessiva, quer à aplicação de lubrificantes inadequados ou contaminados. Existem também avarias de natureza elétrica devidas à passagem de corrente elétrica através dos rolamentos, como resultado do aparecimento de tensões induzidas no veio, que têm como consequências a formação de crateras na superfície dos rolamentos, a degradação do lubrificante e a produção de partículas metálicas [5]. Em geral, uma avaria começa por afetar apenas um componente do rolamento: pista interna, pista externa, gaiola ou esfera; à medida que a avaria evolui, propaga-se a outros componentes. Além disso, estas avarias podem ser descritas de acordo com o mecanismo da avaria, localização ou uma combinação destes [27]. Assim, quando ocorre uma avaria num componente do rolamento, as frequências características do rolamento aumentam de energia, tornando-se visíveis no espectro de vibração ou, caso o sinal de corrente seja analisado, estas frequências características surgirão na análise espectral das frequências. As frequências características são determinadas através das seguintes equações [20], [28]:

$$f_{bor} = \frac{N_{cr} \cdot n}{2} * \left(1 - \frac{D_{cr}}{D_p} * \cos\beta \right) \quad (2.2)$$

$$f_{bir} = \frac{N_{cr} \cdot n}{2} * \left(1 + \frac{D_{cr}}{D_p} * \cos\beta \right) \quad (2.3)$$

$$f_{bs} = \frac{D_p \cdot n}{2 * D_{cr}} * \left(1 - \left(\frac{D_{cr}}{D_p} * \cos\beta \right)^2 \right) \quad (2.4)$$

$$f_{ft} = \frac{n}{2} * \left(1 - \frac{D_{cr}}{D_p} * \cos\beta \right) \quad (2.5)$$

onde:

- f_{bor} = Frequência característica de vibração do anel externo [Hz];
- f_{bir} = Frequência característica de vibração do anel interno [Hz];
- f_{bs} = Frequência característica de vibração dos corpos rolantes [Hz];
- f_{ft} = Frequência característica de vibração da gaiola [Hz];
- N_{cr} = Número de corpos rolantes;
- D_p = Diâmetro primitivo [mm];
- D_{cr} = Diâmetro do corpo rolante [mm];
- n = Velocidade de rotação do veio [Hz];
- β = Ângulo de contacto [°].

Capítulo 3

Avarias nos rolamentos

Este capítulo explica os diferentes tipos de avarias e modos de falha a que os rolamentos estão expostos nos vários ambientes de trabalho. Como foi referido no capítulo anterior, os rolamentos são elementos mecânicos aplicados nas juntas de suporte de componentes rotativos e componentes fixos de uma máquina. Enquanto interface eletromecânica, os rolamentos de elementos rolantes permitem a conversão de energia em motores de indução, tornando-os, no entanto, em equipamentos mais frágeis. De facto, vários estudos estatísticos mostraram que as avarias devidas a rolamentos representam 40 % a 69 % do total das avarias, dependendo da gama de potência dos motores [29], [30].

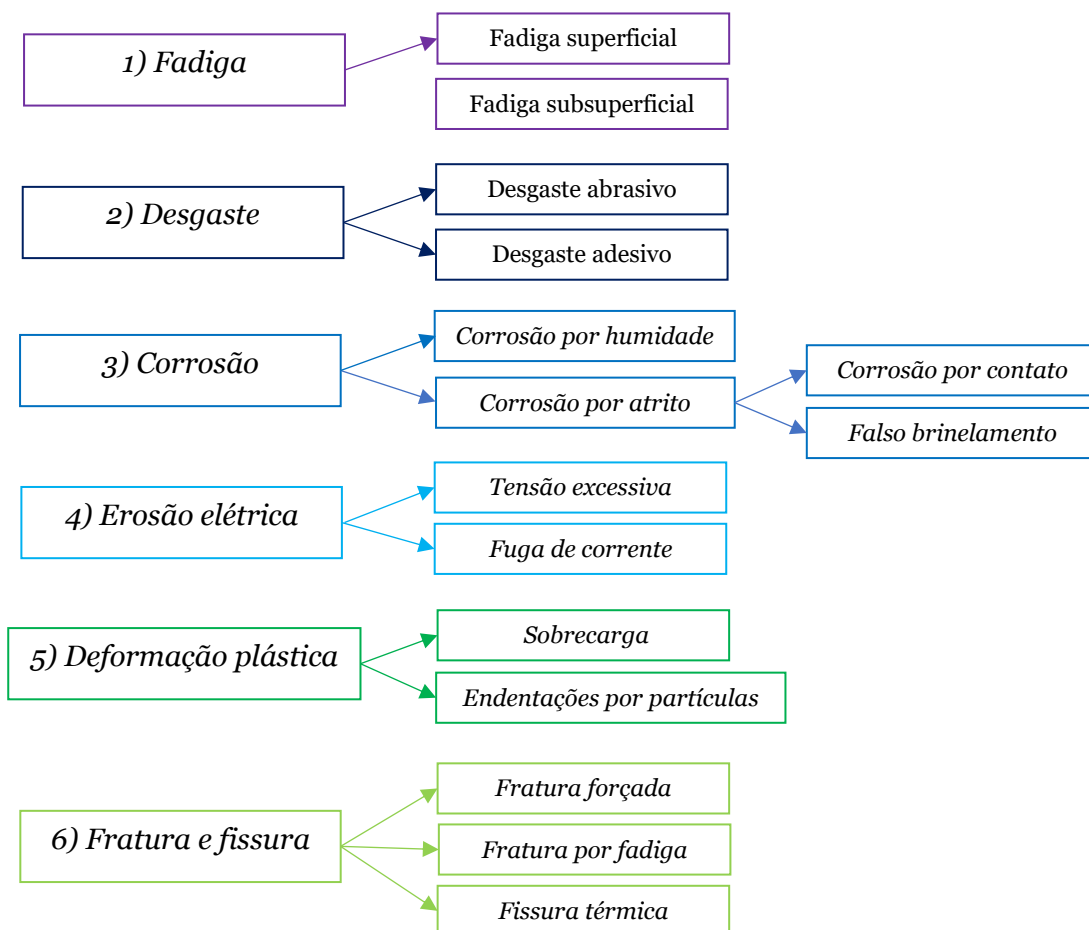


Figura 3.1 - Modos de falha em rolamentos - adaptado de [31].

Para a classificação dos diferentes tipos de avarias de rolamentos, foram tomadas como base as informações da Norma ISO-15243:2017. Esta norma menciona que os modos de falha e

avarias em rolamentos são classificados de acordo com a sua causa principal. Uma causa de avaria tem uma certa característica; um certo mecanismo de avaria pode ser associado a um determinado modo de falha e, a partir do dano observado, a causa principal da avaria pode ser definida [32]. Note-se que não é fácil distinguir entre mecanismos de avaria e modos de falha, com base na experiência de vários artigos e livros que se referem a este tópico. Por isso, os modos de falha são classificados em seis grupos principais, como mostra a Figura 3.1, que resultam da aparência característica visível do rolamento em serviço [31].

3.1 Fadiga

A fadiga do material é um processo permanente e localizado de alterações estruturais, sendo a causa de pelo menos metade de todas as avarias mecânicas. Embora não haja uma percentagem exata na literatura, vários livros e artigos sugerem que entre 50 % e 90 % das avarias mecânicas estão ligadas à fadiga do material [33]. As avarias por fadiga em rolamentos ocorrem após ciclos repetidos sob cargas alternadas, começando com uma fissura numa região vulnerável, seguida de propagação e fratura. Na fadiga de ciclo elevado, não há deformação plástica antes da fratura, classificando-a como frágil. Estas avarias são uma das mais comuns nos rolamentos e são causadas por vários fatores [34].

3.1.1. Fadiga superficial

A fadiga superficial ocorre nas superfícies de contacto do rolamento, principalmente devido às propriedades do material e às características de rugosidade da superfície. O contacto destas rugosidades, tanto no corpo rolante como na via, deve-se principalmente a uma lubrificação inadequada, que envolve vários fatores. Um deles é a presença excessiva de contaminantes sólidos. Nesta circunstância, a lubrificação deixa de ser ótima e a película de lubrificante é reduzida ou torna-se inadequada, podendo também ocorrer se a quantidade ou o tipo de lubrificante não for adequado para a aplicação e as superfícies de contacto não estiverem adequadamente separadas. O resultado do contacto contínuo da rugosidade dos materiais e da deformação plástica faz com que as superfícies se cisalhem umas sobre as outras, o que, juntamente com o micro deslizamento entre as superfícies de contacto corrente, cria uma superfície polida ou envidraçada. O processo inicia-se com a produção de microfissuras nas rugosidades, resultando em microfissuras que acabam por levar à fadiga iniciada na superfície, pelo que a lubrificação adequada é um fator importante na mitigação deste tipo de modo de falha, pois se a película de óleo não separar completamente as superfícies de contacto do rolamento, a de fadiga ocorrerá inevitavelmente [31], [32].

3.1.2 Fadiga subsuperficial

Este tipo de fadiga ocorre num rolamento sob a influência da carga cíclica aplicada aos contatos das pistas e elementos rolantes. À medida que o anel gira, um determinado ponto da pista entra na zona de carga e continua através de uma área para atingir uma carga máxima (tensão) antes de sair da zona de carga. Durante cada rotação, ocorrem tensões e mudanças estruturais do material e microfissuras são iniciadas num local e profundidade que dependem da carga aplicada, da temperatura de operação, do material e de sua limpeza e da microestrutura dos materiais. À medida que esse ponto da pista entra e sai da zona de carga, ocorrem tensões de compressão e cisalhamento, que com o tempo iniciam microfissuras [31], [32]. Os efeitos mais comuns obtidos neste fenómeno são alterações repetidas de tensão, alterações estruturais do material, microfissuras sob a superfície, propagação de fissuras e lascamento [32].

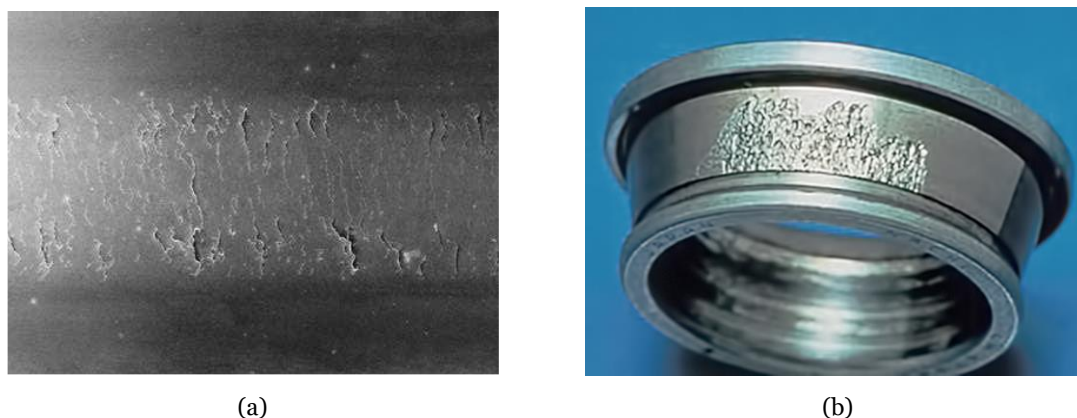


Figura 3.2 – (a) Fragmentação inicial resultante de fadiga iniciada na superfície; (b) Desprendimento subsuperficial inicial no anel interior [32], [31].

3.2 Desgaste

O desgaste é outro modo de falha dos rolamentos. Consiste na remoção progressiva do material da superfície, como resultado da interação entre duas superfícies de contato deslizantes ou rolantes/deslizantes durante o serviço [31]. Este modo de falha ocorre quando o corpo de base e o contra-corpo entram em contacto com um lubrificante deficiente. O desgaste é definido como uma perda contínua de material pela ação mecânica de um anticorpo sólido, fluido ou gasoso [35], [36].

Os materiais removidos são partículas de desgaste e detritos que podem modificar as características de atrito do rolamento. Dependendo do tipo de carga tribológica e dos

materiais removidos, resultam vários tipos de processos de desgaste [36]. De acordo com a ISO-15243:2017, pode ocorrer desgaste adesivo e desgaste abrasivo.

3.2.1 Desgaste abrasivo

De acordo com [31], [32], o desgaste abrasivo é definido como o desgaste de partículas ou desgaste de três corpos, que resulta na remoção progressiva do material. É causada pelo deslizamento de partículas duras/asperezas contra superfícies mais macias, sendo a sujidade, areia, partículas de desgaste metálico e partículas soltas as principais fontes de partículas duras [37]. Nos rolamentos durante a fase inicial de rodagem, observa-se um desgaste ligeiro que se manifesta normalmente como um padrão de trajetória. No entanto, o desgaste abrasivo mais intenso ocorre quando uma superfície macia é cortada por outra superfície dura ou quando uma partícula dura externa atua sobre as superfícies, causando danos [36]. Os mecanismos de desgaste abrasivo incluem micro-cortes, micro-fraturas, arrancamentos e grãos únicos [38].

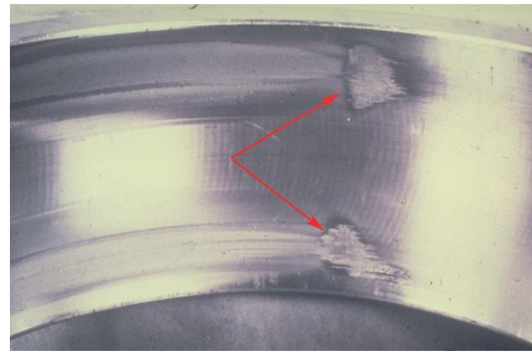
A deterioração da superfície varia consoante a rugosidade e o tipo de partículas abrasivas. À medida que as superfícies do rolamento e, possivelmente, a gaiola de esquilo do rotor se desgastam, o número de partículas abrasivas aumenta gradualmente. Isto acaba por conduzir a um processo de desgaste acelerado que resulta na falha do rolamento [31]. Na maioria das vezes, o desgaste abrasivo real ocorre devido à lubrificação inadequada ou à entrada de contaminantes sólidos [32].

3.2.2 Desgaste adesivo

Este tipo de desgaste é causado pelo deslizamento, ou movimento relativo entre superfícies de contacto, que se caracteriza pela transferência de material de uma superfície para outra [32]. Quando as condições de operação e as características da superfície permitem o contato metal-metal em contatos ásperos, uma junta soldada é formada. Com o movimento relativo entre as superfícies em contacto, o crescimento da ligação é produzido pela deformação plástica [39]. Nos rolamentos, esse tipo de desgaste geralmente ocorre entre os elementos rolantes e as pistas. Dependendo dos diferentes níveis de dano, o desgaste do adesivo é definido por diferentes nomes: *scuffing*, *seizing*, *smearing*, *skidding* e *galling* [36].



(a)



(b)

Figura 3.3 – (a) Desgaste abrasivo da pista interior do rolamento; (b) Contaminação das pistas do anel exterior de um rolamento de rolos esféricos [31], [36].

3.3 Corrosão

A corrosão é o resultado de uma reação química em superfícies metálicas [31]. O modo de falha devido à corrosão nos rolamentos refere-se à reação química ou eletroquímica entre o material da superfície dos rolamentos e o ambiente. A falha por corrosão impede o funcionamento normal dos rolamentos ou causa outras falhas graves [40], [41].

3.3.1 Corrosão por humidade

Este tipo de corrosão ocorre quando um rolamento entra em contacto com humidade, como água ou ácido [36]. Quando a quantidade de contaminantes líquidos excede a capacidade do lubrificante de proteger adequadamente as superfícies de aço, ocorre oxidação ou corrosão das superfícies. Consecutivamente, formam-se marcas de corrosão e, finalmente, fragmentação superficial [32]. Nos rolamentos, é perceptível, nas zonas de contacto entre os elementos rolantes e os anéis de rolamento, os pontos onde o teor de água no lubrificante ou lubrificante degradado reage com as superfícies dos elementos de rolamento adjacentes [31].



Figura 3.4 – Corrosão por humidade na pista do anel exterior [31].

3.3.2 Corrosão por atrito

Existem dois subtipos de corrosão por atrito: corrosão por contato e o falso brinelamento.

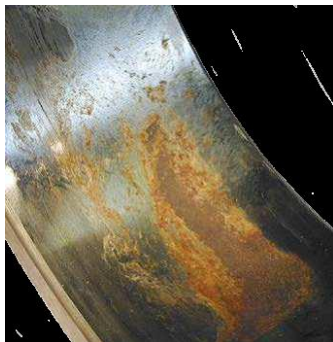
- Corrosão por contato

Danos devido à corrosão por atrito podem ocorrer entre o anel do rolamento e o eixo ou pedestal do rolamento, entre o elemento rolante e o anel, ou entre a gaiola do rolamento e o pino da gaiola, devido ao movimento relativo entre cada elemento [32], [42], [43].

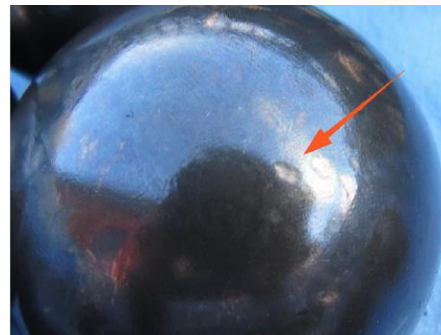
O desgaste por fricção e a corrosão não são modos de falha completamente independentes, uma vez que a ferrugem e o desgaste atuam em conjunto devido à interação entre os dois. De facto, tal interação permite que pequenas partículas de material sejam deslocadas da superfície do rolamento e do seu assento. Estas partículas oxidam rapidamente quando expostas ao ar e o resultado é o óxido de ferro. Um dos efeitos desta situação pode ser o facto de os anéis da chumaceira poderem não ser suportados uniformemente, causando um efeito prejudicial na distribuição da carga na chumaceira. As áreas corroídas também funcionam como entalhes de fratura. As partículas oxidadas parcialmente destacadas também podem atuar como partículas abrasivas para acelerar o desgaste e, sob cargas alternadas, os danos por atrito também podem induzir a nucleação e a propagação de fissuras por fadiga [32], [34].

- Falso brinelamento

Este modo de falha ocorre nas zonas de contacto dos elementos de rolamento cuja incidência depende das condições de trabalho, tais como intensidade de vibração, condições de lubrificação e carga, onde pode ocorrer uma combinação de corrosão e desgaste. O *grooving* (formação de estrias) ocorre quando as cargas excedem a resistência ao rendimento dos materiais de rolamento sob vibrações cíclicas, substanciando-se através de um falso brinelamento na área de contacto [44], [45].



(a)



(b)

Figura 3.5 – (a) Corrosão por contato num furo do anel interior, resultante de uma carga pesada ou de um assento do veio inadequado [32]; (b) Falso brinelamento na superfície de uma esfera de rolamento [46].

Nos rolamentos lubrificados com massa, as depressões são de cor castanho-avermelhada, enquanto nos rolamentos lubrificados com óleo, aparecem depressões muito brilhantes e espelhadas. Os danos nos corpos rolantes são geralmente muito menores [32].

3.4 Erosão elétrica

Uma forma comum de falha do rolamento é a erosão elétrica, causada principalmente por tensão e corrente induzidas no veio do rotor. Dependendo das dimensões da máquina, bem como da sua concepção e processos de fabrico, ou ainda das condições de funcionamento, poder-se-ão criar, no veio, tensões elétricas cuja amplitude exceda a tensão de isolamento da película de lubrificante das chumaceiras, resultando no estabelecimento de um arco elétrico [5]. Este arco consiste na passagem de corrente elétrica através das superfícies de contacto entre os elementos rolantes e a pista [47], [48]. O arco elétrico pode remover materiais da superfície de contacto [31].

3.4.1 Tensão elétrica excessiva

Os danos causados por tensão elétrica excessiva, conhecidos como *pitting* elétrico, podem ser gerados de forma intencional ou acidental, quando são induzidas diferenças de tensão entre o suporte do rolamento e o eixo, onde a corrente subsequentemente produz faíscas e arcos entre os anéis dos rolamentos. Em alguns casos, a superfície do rolamento pode derreter.

A Figura 3.6 mostra as quatro fases do mecanismo de erosão por tensão elétrica excessiva. Na fase (a), ocorre um processo semelhante à soldadura por arco elétrico nas superfícies de contacto. Na fase (b), o material é aquecido a temperaturas muito elevadas até atingir níveis de fusão, provocando o aparecimento de áreas descoloradas e a formação de crateras onde o material derreteu, acabando este por se desprender devido à rotação do corpo rolante. Na fase c), o excesso de material no corpo rolante desgasta-se. Finalmente, em d), os danos já são evidentes, com a formação de crateras de até 0,5 mm nas pistas e corpos rolantes, sendo também possível observar queimaduras em ziguezague nas pistas do rolamento e queimaduras locais nas pistas e corpos rolantes [32], [49].

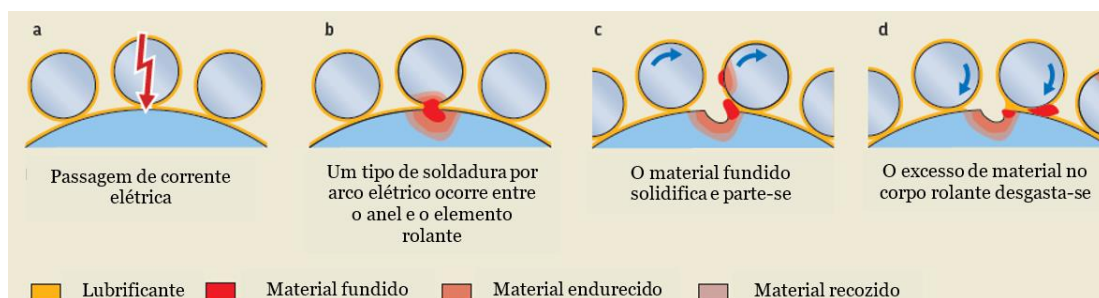


Figura 3.6 – Mecanismo de erosão por tensão elétrica excessiva [32].

3.4.2 Fuga de corrente

A fuga de corrente pode ocorrer a partir de corrente alternada ou contínua relativamente pequena [39], que é mais ligeira do que o *pitting* elétrico. Na sua fase inicial, a superfície afetada por este fenómeno é geralmente danificada por crateras pouco profundas que estão muito próximas umas das outras. Posteriormente, esses aglomerados de crateras formam estrias uniformemente espaçadas, de cor escura, que só podem ser encontradas em rolos e superfícies de pista. A extensão dos danos depende de vários fatores: intensidade da corrente, duração, carga do rolamento, velocidade e lubrificante [31], [32].

A Figura 3.7 mostra este tipo de avaria num rolamento.



Figura 3.7 – a) Crateras de 0,5 mm de dimensão [32]; b) Danos na pista interior causada por erosão por fuga de corrente [50].

3.5 Deformação plástica

A deformação plástica resulta quando o material é submetido a forças e tensões que excedem o limite elástico, o que faz com que o material se deforme significativamente e não possa voltar à sua forma original, afetando o funcionamento normal do rolamento. Tal significa que a deformação plástica é muito complicada e o seu progresso é irreversível [34], [51]. Existem alguns fatores que contribuem para esta deformação, como a sobrecarga ou a temperatura elevada e a distribuição não uniforme da carga ou a instalação incorreta dos rolamentos [52], [53], [54].

3.5.1 Sobrecarga

A deformação plástica devida à sobrecarga resulta de cargas estáticas excessivas, cargas de choque ou manuseamento inadequado, o que pode fazer com que algumas áreas do rolamento se desgastem mais rapidamente do que outras [32], [55]. A posição da deformação devido à sobrecarga está relacionada com a passagem dos elementos rolantes [31]. A Figura 3.8 mostra os danos causados pela deformação plástica na pista interna de um rolamento de esferas radial, resultantes de carga axial excessiva.



Figura 3.8 – Anel interno do rolamento radial de esferas [56].

3.5.2 Indentações por partículas

Este modo de falha resulta de contaminantes sólidos, normalmente gerados a partir de resíduos de desgaste, partículas residuais, lubrificantes sujos e água, que podem ser introduzidos num rolamento através de vedações ou lubrificantes [32], [57]. Há também a possibilidade de que esses contaminantes sólidos venham do desgaste ou danos a um componente adjacente ao rolamento.

Geralmente, um contaminante sólido rola através da pista pela ação dos corpos rolantes e provoca indentações no rolamento. Mesmo que estas partículas sejam macias, mas de tamanho considerável, causarão danos consideráveis. A Figura 3.9 mostra múltiplas indentações causadas por partículas sólidas que entram no rolamento e afetam a superfície da pista interior de um rolamento de rolos cônicos.

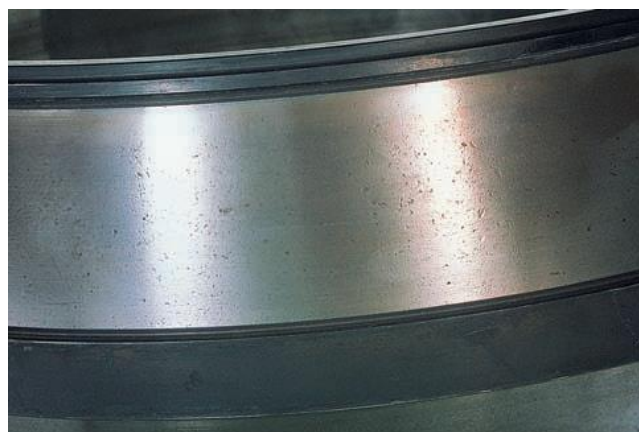


Figura 3.9 – Indentações na superfície da pista do anel interno do rolamento de rolos cônicos [56].

3.6 Fratura e fissura

A fratura e as fissuras nos rolamentos são causadas por condições severas de funcionamento, incluindo lubrificação inadequada, conceção e seleção incorreta do rolamento, e ajustes excessivamente apertados [39]. Dentro deste modo de falha, distinguem-se três categorias, que são descritas a seguir.

3.6.1 Fratura forçada

Este tipo de fratura é causado por uma concentração excessiva de tensões mecânica, que excedem a resistência à tração do material, causando danos ao rolamento. As causas mais comuns são o esforço excessivo e a sobrecarga local, que causam fratura forçada [31], [32]. Um exemplo deste tipo de anomalia são as fissuras brancas (WEC), criadas por tensões de tração excessivas [58], que podem ser vistas na Figura 3.10.

Outras formas de fratura forçada resultam de impactos diretos nos anéis do rolamento. Isso pode levar ao aparecimento de rachaduras finas, que mais tarde se transformarão em rachaduras quando o rolamento for colocado em operação, quando uma unidade é excessiva pode causar a quebra do anel interno. As tensões do anel (de tração), que aparecem no anel como resultado de um excessivo *drive-up*, causam a fissuração do anel em serviço [32].



Figura 3.10 – Rolamento da caixa de velocidades de uma turbina eólica WECS [59].

3.6.2 Fratura por fadiga

Este tipo de fratura deve-se ao processo de fadiga que ocorre nos componentes do rolamento, que são submetidos a um certo número de ciclos sob a ação de cargas alternadas [34]. O processo inicia-se com uma fissura inicial devido à flexão repetida e à concentração de tensões mecânicas, cuja origem ocorre numa área localizada, que se propagam pela ação de tensões alternadas até atingir a fratura do elemento [32]. As falhas de fadiga são uma forma comum de falha nos rolamentos, uma vez que os rolamentos estão sujeitos a cargas

cíclicas no seu funcionamento. De facto, existem muitos fatores que influenciam este tipo de falha [34]. Dependendo do número de ciclos, a falha por fadiga pode ser dividida em fadiga de ciclo elevado (acima de 10⁵ ciclos) e fadiga de ciclo reduzido (abaixo de 10⁴ ciclos). Na fadiga de ciclo elevado, existe uma pequena tensão, cujas microfraturas apresentam finas estrias perpendiculares à direção de expansão da fadiga. Já na fadiga de ciclo reduzido, a tensão é normalmente mais elevada, podendo exceder a tensão de cedência do material e envolver a gama de deformação plástica [60], [61].

3.6.3 Fissura térmica

A fissura térmica é produzida pela ação do calor, tipicamente resultante do atrito entre o deslizamento de duas superfícies. Ao atingir um aquecimento elevado, ocorre a formação de fissuras que ocorrem sempre (ou de forma recorrente) na orientação perpendicular à direção do deslocamento [32], [62]. Entre os fatores que contribuem para esse tipo de falha estão os desalinhamentos mecânicos, lubrificação inadequada, contaminação e sobreaquecimento do rolamento [62].

A Figura 3.11 mostra uma fratura na pista externa de um rolamento de rolos cilíndricos, tomado como um estudo de caso em [61], que foi selado na extremidade do acionamento de um motor ventilador de ar com uma velocidade de rotação de 990 rpm. De acordo com a análise realizada, a temperatura de funcionamento excessiva do rolamento foi um dos elementos conducentes à degradação do rolamento [61].



Figura 3.11 – Danos na pista exterior do rolamento devido a fissuras térmicas [61].

Capítulo 4

Métodos de Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução

4.1 Introdução

O diagnóstico de avarias em ambiente industrial é atualmente fundamental, assumindo grande relevância e interesse na comunidade académica e no sector laboral. O controlo ótimo e o diagnóstico de eventuais avarias e falhas no equipamento de trabalho encontram-se plenamente ligados a uma correta estratégia de desempenho e manutenção, que tem múltiplos objetivos, tais como garantir a maior fiabilidade das máquinas, maximizar a vida útil, evitar paragens desnecessárias, e muito mais, o que leva a uma redução de custos inesperados. À semelhança do diagnóstico clínico do corpo humano, o diagnóstico de avarias implica a caracterização da condição de um equipamento, através da consideração dos sintomas que manifesta [5].

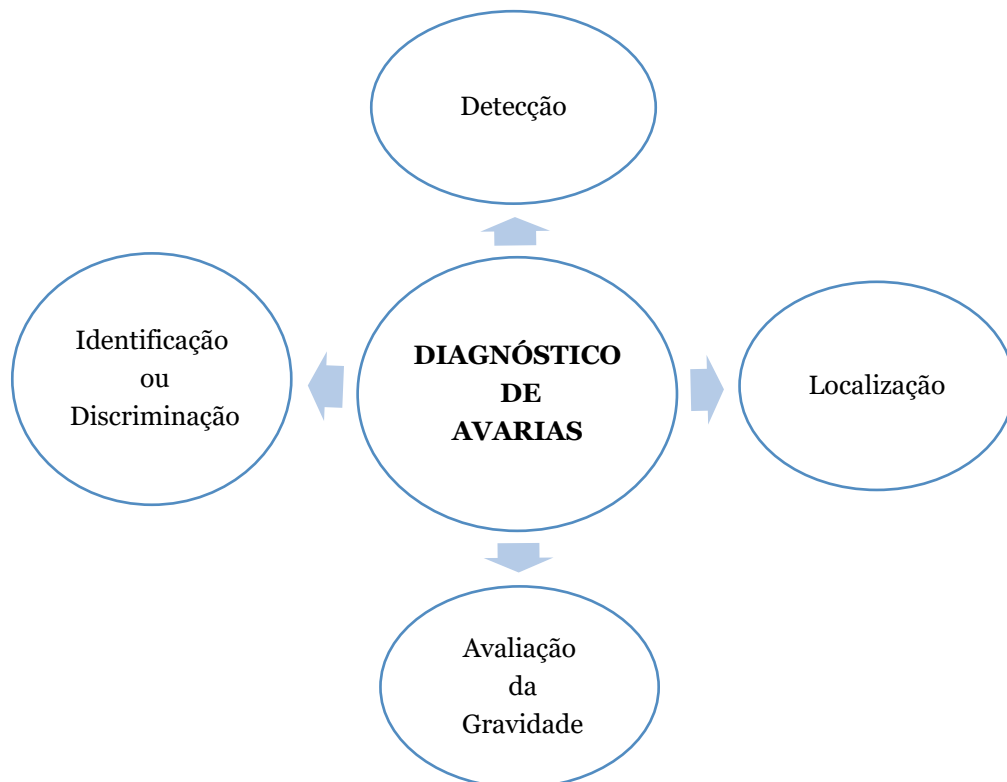


Figura 4.1 – Aspectos intrínsecos ao processo de diagnóstico [5].

Assim, uma avaria pode ser definida como “*a condição de um equipamento, material, ou sistema, caracterizada pela cessação da possibilidade do desempenho cabal das funções requeridas*” [5]. Distinguem-se três categorias principais de avarias: catastróficas, evolutivas e intencionais. Destas, as avarias do tipo evolutivas são as mais adequadas para a aplicação de métodos de diagnóstico precoce.

A Figura 4.1 mostra os quatro aspetos intrínsecos ao processo de diagnóstico: detecção, localização, avaliação da gravidade e identificação ou discriminação. A detecção da avaria é o principal objetivo da monitorização dos parâmetros que indicam a sua ocorrência [5]. Após a deteção da avaria, a identificação ou discriminação de avarias é outro aspeto fundamental do processo de diagnóstico. Dependendo do tipo de avaria detetada, podem ser utilizadas abordagens específicas para um diagnóstico mais completo e fiável. A localização da avaria é crucial para aplicar acções de reparação, uma vez que o conhecimento da sua posição evita a necessidade de desmontar todo o equipamento, reduzindo tempo e custos. Para além disso, um diagnóstico completo deve fornecer informações sobre a localização da avaria e avaliar a gravidade da mesma, o que é essencial para a gestão do risco e para a tomada de decisões [6].

No desenvolvimento de métodos de diagnóstico de avarias, distinguem-se duas grandes famílias. Os métodos de diagnóstico off-line são implementados em situações não operacionais (a máquina deve estar fora de serviço ou mesmo desmontada, para tornar certos componentes acessíveis). Já os métodos on-line permitem a respetiva aplicação com o equipamento em serviço, não havendo necessidade de interromper o funcionamento da máquina ou equipamento, o que os torna mais atrativos [5]. Em [63], é referido que os métodos de diagnóstico de avarias podem ser classificados em métodos baseados em modelos, métodos baseados em sinais, métodos baseados em conhecimento, métodos híbridos (combinação de pelo menos dois métodos) e métodos ativos de diagnóstico de avarias.

Em resumo, o campo de estudo dos métodos de diagnóstico de avarias é muito vasto, apresentando várias perspetivas de análise e classificação de métodos que foram desenvolvidos ao longo dos anos. Assim, este capítulo visa analisar métodos de diagnóstico para a análise da condição de MIs trifásicos, baseados em abordagens *on-line* e não invasivas.

4.2 Métodos de diagnóstico baseados em sinais

O diagnóstico de avarias dos MIs é realizado principalmente através do uso de diferentes sinais, que podem ser adquiridos a partir dos motores, cujas características são extraídas. Com base na experiência de operação em condições normais e na análise dos sintomas apresentados, pode ser efetuado o diagnóstico. Estas características viabilizam a aplicação

dos métodos em conversores de potência e componentes mecânicos de um sistema [63]. Os sinais mais frequentemente utilizados para o diagnóstico são os sinais de vibração, os sinais de emissão acústica, as correntes de alimentação do motor, a tensão elétrica, a temperatura, a velocidade, o fluxo magnético e a imagem térmica [5], [64].

O MI de rotor em gaiola de esquilo pode apresentar uma variedade de avarias, tanto internas como externas. Dentro das avarias internas, incluem-se as avarias nos rolamentos, avarias nas barras do rotor, entre outras. Já as avarias externas incluem flutuações de tensão, variações de carga, desequilíbrios na alimentação e variações de frequência [65].

Diversos estudos sobre este tema, destacam alguns métodos baseados em análise de sinais. Por exemplo assinaturas experimentais de vibração foram usadas no diagnóstico de avarias em rolamentos, com base em métodos simples de análise no domínio da frequência, métodos estocásticos de vibração e análise nos domínios da frequência e do tempo [66]. Em [67], uma revisão geral resume as técnicas de diagnóstico utilizando a análise da assinatura da corrente do motor - *Motor Current Signature Analysis* (MCSA), os avanços recentes do ponto de vista das técnicas de análise do espectro - transformada de desmodulação, análise tempo-frequência, estimação de parâmetros e inteligência artificial - que incluem critérios de diagnóstico de avarias típicas de motores elétricos, tais como avarias nos rolamentos, curto-circuitos entre espiras do estator e ruptura de barras do rotor. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, foi possível reforçar e incorporar técnicas de diagnóstico e classificação das avarias neste domínio.

No que diz respeito à análise de avarias de rolamentos em máquinas elétricas, vários estudos têm sido desenvolvidos, utilizando uma grande variedade de técnicas e métodos. No campo da investigação, têm sido desenvolvidas técnicas para diagnosticar uma ampla gama de avarias neste tipo de motores, quando essas avarias ainda estão em estágios iniciais ou prematuros. A maioria dessas técnicas é baseada num único parâmetro, uma vez que os autores buscam simplicidade e economia dos seus métodos. A análise de sinais de vibração é um dos métodos mais comuns e eficazes para o diagnóstico de avarias mecânicas. No entanto, devido ao elevado custo dos sensores de vibração e à necessidade de contato direto com motores para extração de sinal, o interesse nestes métodos é limitado em múltiplas aplicações [68], [69], [70]. Por estas razões, existe a necessidade e o interesse acadêmico em desenvolver métodos de diagnóstico que contribuam para apoiar o campo da análise e monitorização do estado de equipamentos e máquinas, especialmente nas aplicações onde os métodos convencionais não podem ser aplicados.

Com base na corrente elétrica, em [71] identificam-se danos nos rolamentos, aplicando algoritmos de inteligência artificial. Para a monitorização de rolamentos de MIs, são utilizados os sinais de corrente do estator, sendo estes processados utilizando uma arquitetura de Aprendizagem Profunda [72]. Através da análise de sinais elétricos (corrente

e tensão do estator), foi possível detetar danos aos rolamentos, utilizando filtragem Wiener para extrair as informações mecânicas contidas na corrente elétrica, de acordo com indicadores estatísticos como a curtose [22]. Quando não são alcançados bons resultados usando MCSA em condições de carga reduzida, a análise de potência instantânea (IPA) é implementada para diagnosticar avarias de rolamentos em várias condições de carga. Uma comparação entre estes métodos demonstra que a IPA contém uma componente adicional de frequência de vibração característica, que fornece informação adicional que pode ser utilizada num sistema de monitorização, inteligente e fiável, das condições dos rolamentos do MI [73]. Em [28], é realizado um estudo sobre o diagnóstico de avarias em rolamentos do MI trifásico utilizando a corrente elétrica estatórica, a análise espectral de vibrações, do binário eletromagnético e da componente alternada do módulo do vetor de Park. A utilização da STFT foi implementada para o diagnóstico de avarias de lubrificação e mecânicas em rolamentos utilizados em MI [74]. Em [75], a STFT é aplicada a um MI alimentado por um inversor PWM, para determinar as variações temporais de frequência no sinal de corrente do estator, combinando um algoritmo de localização de máximos, onde apenas os harmónicos com informações úteis sobre avarias existentes são mostrados.

Da análise da literatura, verifica-se que existe uma extensa investigação neste campo das avarias, que envolvem diferentes tipos de métodos e técnicas de processamento de sinais, onde alguns métodos se destacam de outros, dependendo da aplicação. Neste estudo, e tomando como ponto de partida as investigações realizadas anteriormente, considera-se de grande interesse explorar a análise não invasiva deste tipo de avarias mecânicas em motores de indução, tornando assim a análise da corrente do estator uma das melhores opções, devido à quantidade de informação que esta grandeza pode fornecer.

A corrente estatórica não só é modulada pela onda fundamental de potência e pela avaria, mas também inclui harmónicos gerados por flutuações de potência e variações de carga [67]. Os sinais baseados na corrente elétrica do estator são tipicamente medidos, de forma direta, pelo sistema de alimentação ou pelos inversores, permitindo a aquisição de dados baseados na corrente na maioria dos casos industriais [71].

A Figura 4.2 mostra um diagrama geral representativo de um método de diagnóstico baseado na análise da corrente do estator através da transformada de Park que foi aplicada em [67] e que permite explicar, de uma forma geral, o processo de diagnóstico através do sinal de corrente elétrica. No processo, incluem-se as etapas de aquisição de dados, a transformada de Park, a técnica de análise implementada e o diagnóstico de avarias.

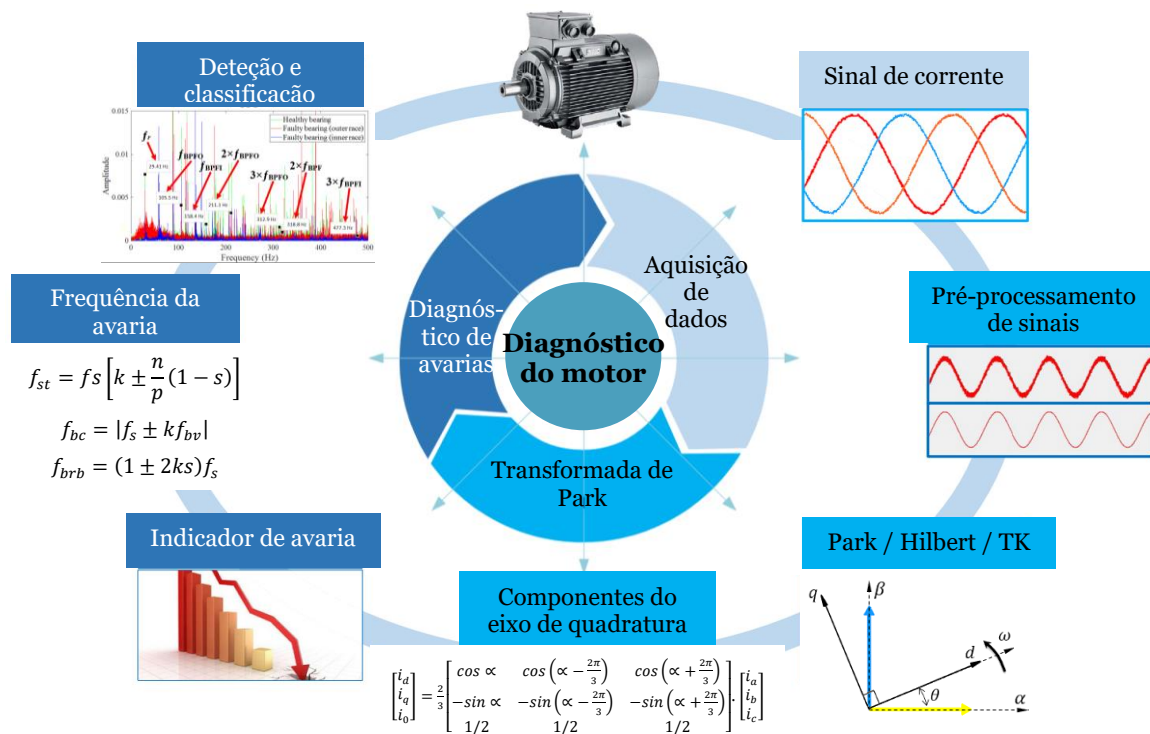


Figura 4.2 - Fluxograma para o diagnóstico de avarias em MIs com base no sinal da corrente elétrica, adaptado de [67].

4.3 Técnicas de Processamento de Sinais

Os métodos baseados em grandezas elétricas e não elétricas podem envolver a aplicação de técnicas avançadas de processamento de sinais, juntamente com técnicas de monitorização e classificação. As técnicas de Transformada de Wavelet (WT), a Decomposição Modal Empírica (EMD), a Análise de Componentes Principais (PCA) e a Abordagem do Vetor de Park (PVA), são algumas das técnicas que fornecem os resultados mais interessantes [76]. As técnicas de processamento de sinais consistem na análise no domínio do tempo (média, desvio padrão, o valor eficaz - RMS, o pico máximo, a curtose, etc.), análise no domínio da frequência (espectro), ou análise no domínio do tempo e da frequência [63], [77]. Para este estudo, considerou-se analisar o sinal da corrente elétrica do estator, conjugando a aplicação do método EPVA, baseado na análise de frequência, com o método STFT, que envolve a análise nos domínios do tempo e da frequência.

4.3.1 Short Time Fourier Transform (STFT)

As análises tempo-frequência são utilizadas para identificar os componentes de frequência do sinal e revelar as suas características variáveis ao longo do tempo, sendo assim uma ferramenta muito útil para o diagnóstico de avarias de sinais não estacionários [78], que

ocorrem por vários fatores dentro das máquinas elétricas devido a variações de carga e à presença de avarias do sistema.

Entre os métodos mais conhecidos para a análise de frequência-tempo está o STFT, que é uma extensão da Transformada de Fourier (FT) aplicada a sinais não estacionários. O sinal é dividido em pequenas janelas temporais, sendo a transformada de Fourier aplicada a cada uma dessas janelas. O resultado é representado num gráfico 3D onde o eixo “x” mostra o tempo, o eixo “y” as variações de frequência ao longo do tempo, e as alterações de cor indicam a amplitude da frequência. Matematicamente, a STFT é definida pela seguinte equação (4.1), [79], [80], [81], [82]:

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t - \tau)s(\tau)e^{-j2\pi f\tau} . d\tau \quad (4.1)$$

A STFT pode ser definida como uma função da frequência ω de acordo com a equação (4.2):

$$S(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t - \tau)s(\tau)e^{-j\omega\tau} . d\tau \quad (4.2)$$

onde s é o sinal, w é a função de janela, e t e ω são os parâmetros de tempo e frequência, respetivamente. A FT calcula o espectro de cada janela temporal, resultando numa representação tridimensional. A STFT permite visualizar o conteúdo de frequência ao longo do tempo, ou seja, torna-se possível avaliar o sinal em função do tempo e, simultaneamente, obter a informação sobre a frequência [83].

O espectrograma é baseado na STFT e é definido matematicamente como o quadrado do módulo da STFT. É um gráfico tridimensional que expressa a energia associada a cada componente espectral do sinal, que evolui ao longo do tempo. Pode ser expresso pela equação (4.3) [84]. A resolução de tempo e frequência do espectrograma é limitada pelo princípio da incerteza de Heisenberg-Gabor, que afirma que não se pode ser infinitamente preciso em tempo e frequência [85].

$$espectrograma(t, \omega) = |S(t, \omega)|^2 \quad (4.3)$$

Para efetuar uma análise utilizando a STFT, é importante conhecer os parâmetros em que esta se baseia e que, em função deles, permitem obter uma melhor resolução, tanto em frequência como no tempo.

Frequência de amostragem (Fs)

Este parâmetro afeta diretamente o tempo e a resolução de frequência da saída da STFT. Assim, se um sinal for amostrado com taxa de amostragem F_s elevada, o resultado é uma melhor resolução temporal e uma baixa resolução em frequência, e se F_s for baixo, obtém-se o oposto [82].

Número das amostras de entrada (n)

Neste caso, é o número de amostras de entrada da corrente elétrica, que será aplicado dentro da função de janela. Aumentando n, o tamanho da janela aumenta, melhorando assim a resolução espectral [82].

Número total de pontos da FFT (N)

Ao considerar um maior número de pontos para a FFT, obtém-se uma melhor resolução de frequência da saída STFT. Ao mesmo tempo, é possível melhorar a transformada contínua de Fourier (CFT) do sinal de entrada. Por outro lado, o tempo de processamento aumentará.

Tipo de função da janela espectral

Existem várias funções de janela espectral que são usadas para limitar a distorção no domínio da frequência. Estas podem ser a janela de Bartlett-Hann, Bartlett, Blackman, Blackman-Harris, Bohman, Chebyshev, Flat Top, Gaussian, Hamming, Hann, Kaiser, Blackman-Harris de Nuttall, Parzen, Retangular, Tapered cosseno e Triangular [76]. Uma janela de curta duração proporciona uma boa resolução temporal à custa de uma baixa resolução de frequência, enquanto uma janela de longa duração proporciona uma boa resolução de frequência à custa de uma baixa resolução temporal [86].

Tamanho do salto (H)

É responsável pela resolução temporal da saída da STFT. Quanto menor for o tamanho do salto, melhor será a resolução temporal [82].

O método STFT tem associado um elevado custo computacional, sobretudo caso seja necessária uma boa resolução [63]. Esta técnica, derivada da FFT, tem a desvantagem de ter duas resoluções: uma no tempo e outra na frequência. Assim, quando a resolução no tempo é aumentada, a resolução na frequência piora e vice-versa [87]. Em função de danos em rolamentos, o espectro de corrente evidencia a severidade dos deslocamentos mecânicos produzidos pelas avarias em rolamentos, pois tais avarias vão produzir um movimento radial entre o rotor e o estator da máquina que faz variar o entreferro da máquina [88]. Em [89], [90], [91], mostra-se que estas variações geram componentes espectrais da corrente de linha no estator. Tais componentes espectrais são definidas e são obtidas pela equação (4.4):

$$f_{STFT} = |f_s \pm k f_n| \quad (4.4)$$

em que f_s é a frequência fundamental de alimentação do motor, f_n são as frequências características do rolamento, que são função das equações (2.2), (2.3), (2.4) e (2.5) e k toma valores inteiros de 1, 2, 3,

É importante notar que as magnitudes destas variações dos componentes harmônicos são pequenas em relação aos harmônicos constituintes espectrais e estão localizadas em

posições diferentes, o que permite distinguir entre funcionamento saudável e não saudável [91].

4.3.2 Extended Park's Vector Approach (EPVA)

O método EPVA baseia-se na abordagem do vetor de Park (PVA), aplicado a MIs trifásicos, que são normalmente alimentados por três condutores. Em condições normais de funcionamento, a componente homopolar da corrente elétrica de alimentação apresentar-se-á nula, o que continua a ser válido mesmo na maioria das avarias que afetam estes motores. O cálculo das componentes do vetor de Park (i_D , i_Q), em relação às correntes elétricas de alimentação (i_A , i_B , i_C), são definidas da seguinte forma [5]:

$$i_D = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}i_A - \frac{1}{\sqrt{6}}i_B - \frac{1}{\sqrt{6}}i_C \quad (4.5)$$

$$i_Q = \frac{1}{\sqrt{2}}i_B - \frac{1}{\sqrt{2}}i_C \quad (4.6)$$

Em condições ideais, as correntes trifásicas conduzem a uma componente do Vetor de Park de acordo com (4.7) e (4.8):

$$i_D = \frac{\sqrt{6}}{2}i_{Max} * \cos(\omega t) \quad (4.7)$$

$$i_Q = \frac{\sqrt{6}}{2}i_{Max} * \sin(\omega t) \quad (4.8)$$

onde:

i_{Max} : Valor máximo da corrente da fase de alimentação [A];

ω : Frequência angular de alimentação [rad/s];

t : tempo [s];

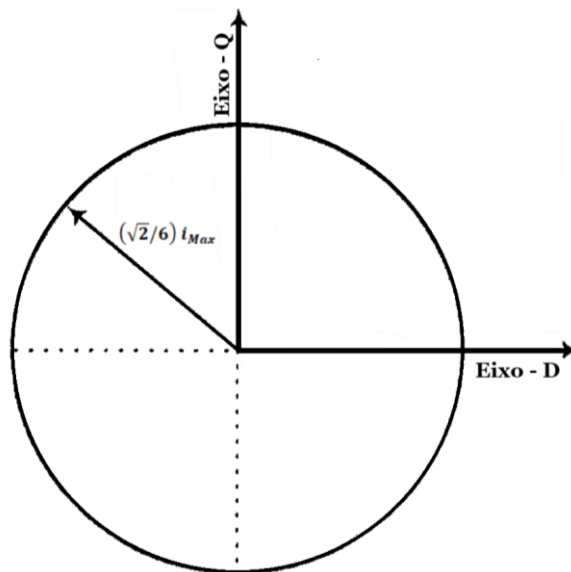


Figura 4.3 – Vetor de Park [92].

Para além disso, um sistema de correntes trifásicas equilibradas conduz, em condições ideais, a um vetor de Park que é um padrão circular centrado na origem das coordenadas, apresentando uma componente DC. A Figura 4.3 mostra a representação gráfica das componentes do vetor de Park, em condições ideais.

Quando o motor apresenta algum tipo de avaria, ou seja, em condições anormais de funcionamento, as equações (4.7) e (4.8) deixam de ser válidas, e o espetro da corrente de alimentação do motor passará a conter frequências diferentes das fundamentais, devido às frequências $(f_s - kf_n)$ e $(f_s + kf_n)$, explicadas na equação (4.4). Assim, a representação do vetor de Park passa a possuir também componentes AC, para além da componente DC [89], [92].

Para identificar estas variações, foi desenvolvida a técnica EPVA, que é especificamente utilizada para discriminar a informação contida no módulo da corrente do Vetor de Park, que é o resultado de uma análise espectral do nível AC do módulo do Vector de Park da corrente de alimentação do motor. O EPVA combina a simplicidade da técnica anterior e a visão detalhada fornecida pela análise espectral [93].

Considerando a existência de avarias no rolamento, as correntes de alimentação do motor podem ser expressas da seguinte forma:

$$i_A = I_f \cdot \cos(\omega_s t - \alpha) + I_{dl} \cdot \cos(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l) + I_{dr} \cdot \cos(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r) \quad (4.9)$$

$$i_B = I_f \cdot \cos(\omega_s t - \alpha - 2\pi/3) + I_{dl} \cdot \cos[(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l - 2\pi/3)] + I_{dr} \cdot \cos[(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r - 2\pi/3)] \quad (4.10)$$

$$i_C = I_f \cdot \cos(\omega_s t - \alpha + 2\pi/3) + I_{dl} \cdot \cos[(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l + 2\pi/3)] + I_{dr} \cdot \cos[(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r + 2\pi/3)] \quad (4.11)$$

onde:

I_f : Valor máximo do termo fundamental da corrente elétrica de alimentação do motor, na presença de avaria no rolamento [A];

I_c : Valor máximo da componente espectral da corrente elétrica absorvida pelo motor associada à frequência $|f_s - kf_n|$ [A];

I_c : Valor máximo da componente espectral da corrente elétrica absorvida pelo motor associada à frequência $|f_s + kf_n|$ [A];

α : Fase inicial do termo fundamental da corrente elétrica de alimentação do motor [rad];

β_l : Fase inicial da componente espectral da corrente elétrica de alimentação do motor associada à frequência $|f_s - kf_n|$ [rad];

β_r : Fase inicial da componente espectral da corrente elétrica de alimentação do motor associada à frequência $|f_s + kf_n|$ [rad];

ω_i : Frequência angular natural [rad/s].

De acordo com a análise das equações (4.9), (4.10) e (4.11), as componentes do vetor de Park da corrente elétrica são determinadas por:

$$i_D = \sqrt{\frac{3}{2}} I_f \cdot \cos(\omega_s t - \alpha) + \sqrt{\frac{3}{2}} I_{dl} \cdot \cos(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l) + \sqrt{\frac{3}{2}} I_{dr} \cdot \cos(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r) \quad (4.12)$$

$$i_Q = \sqrt{\frac{3}{2}} I_f \cdot \sin(\omega_s t - \alpha) + \sqrt{\frac{3}{2}} I_{dl} \cdot \sin(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l) + \sqrt{\frac{3}{2}} I_{dr} \cdot \sin(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r) \quad (4.13)$$

Assim, o módulo do vetor de Park da corrente do estator é definido por:

$$\begin{aligned} |i_D + j i_Q|^2 = & \frac{3}{2} (I_f^2 + I_{dl}^2 + I_{dr}^2) + 3I_f I_{dl} \cos(\omega_n t - \alpha + \beta_l) + 3I_f I_{dr} \cos(\omega_n t + \alpha - \beta_r) \\ & + 3I_{dl} I_{dr} \cos(2\omega_n t - \beta_r + \beta_l) \end{aligned} \quad (4.14)$$

A expressão do quadrado do módulo do vetor de Park tem 4 termos, sendo o primeiro o termo constante dominante. É constituído tanto pela presença da componente fundamental f_s , como pela componente espectral da corrente associada à avaria. Os 2 termos seguintes, associados a f_n , representam as amplitudes de cada termo, sendo o resultado do produto da amplitude do termo fundamental da corrente elétrica pela amplitude de cada uma das componentes espectrais associadas à avaria. O último termo apresenta uma componente associada a $2 * f_n$, em que a sua amplitude depende apenas do produto das amplitudes das componentes espectrais da corrente elétrica associadas ao defeito, cujas amplitudes espectrais são inferiores à amplitude do termo fundamental da corrente elétrica absorvida pelo motor. Deste modo, na análise do espectro de frequências do vetor de Park, é possível visualizar as componentes espectrais associadas às avarias dos rolamentos através da seguinte expressão [28], [89].

$$f_{EPVA} = k * f_n \quad (4.15)$$

Onde f_n são as frequências naturais dos componentes do rolamento, que são calculadas através das equações, (2.2), (2.3), (2.4) e (2.5), sendo $k = 1, 2, 3, 4, \dots$. Para além disso, é importante notar que o EPVA, ao ter em conta a corrente nas três fases, fornece um espectro mais significativo do que o obtido pela análise espectral convencional da corrente elétrica do motor [89], [93].

4.3.3 Abordagem Híbrida

Para o diagnóstico de avarias, existem vários métodos a maioria baseados em modelos, em sinais e em conhecimento, cada um com as suas vantagens e limitações. O diagnóstico baseado em modelos requer precisão, mas é eficaz com poucos dados. Os métodos baseados em sinais e no conhecimento não requerem modelos explícitos, o que os torna úteis para

processos complexos. No entanto, os primeiros são sensíveis a perturbações e os segundos dependem de grandes volumes de dados, o que aumenta os custos e dificulta a deteção de avarias desconhecidas. Para ultrapassar estas limitações, podem ser combinadas várias abordagens, criando um método de diagnóstico híbrido que aproveita os pontos fortes de cada uma delas [94].

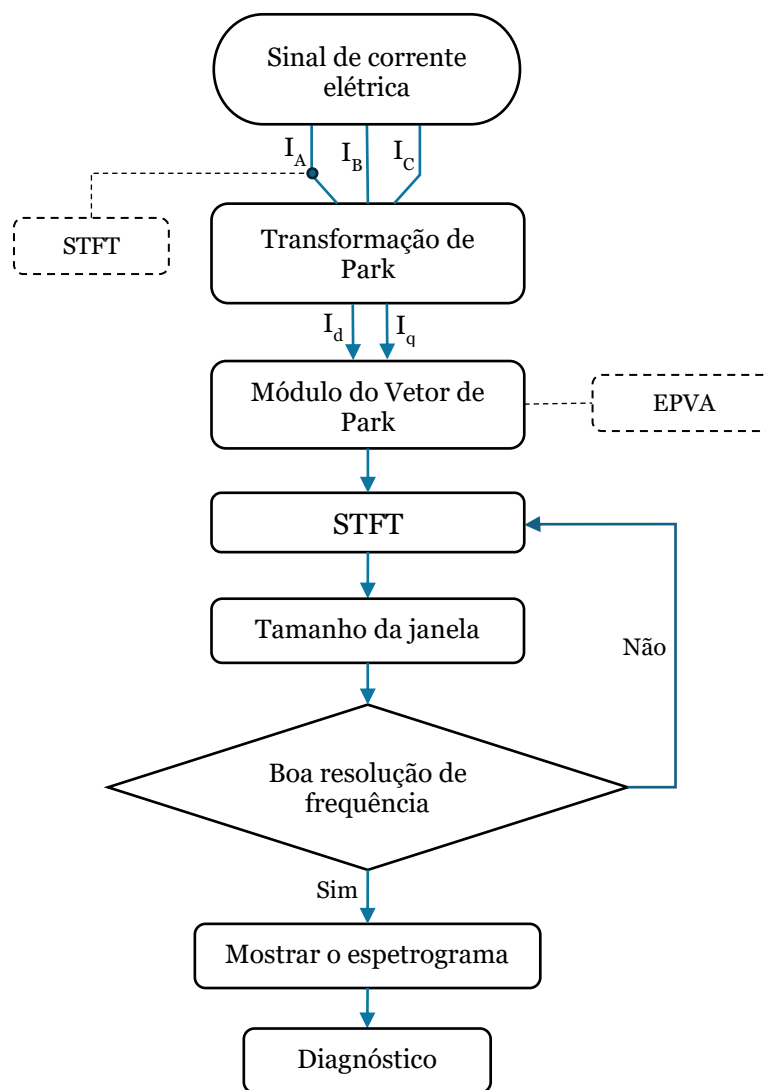


Figura 4.4 – Diagrama de blocos da abordagem híbrida.

Neste estudo, é implementada uma abordagem híbrida para o diagnóstico de avarias, com o objetivo de aproveitar as vantagens tanto da STFT como do EPVA. A Figura 4.4 apresenta um diagrama do processo onde se integram estas duas técnicas de análise baseadas em sinais. O processo de diagnóstico começa com as correntes do estator (I_A , I_B e I_C), a partir das quais são determinadas as componentes do vetor de Park (I_d e I_q), através da transformada de Park, obtendo-se o módulo do vetor de Park. A este sinal processado, aplica-se a técnica STFT, que permite a análise no domínio tempo-frequência. Dado que é crucial obter uma boa resolução em frequência, são testados vários tamanhos de janela até

se obter uma resolução de frequência adequada. Se não for obtida uma resolução ótima, o processo é ajustado até que esta seja alcançada. Por fim, gera-se o espectrograma para posterior análise e diagnóstico.

O diagrama também ilustra claramente o caminho seguido por cada método. Para a aplicação direta da STFT, apenas é necessária a informação de uma das fases da corrente, à qual a STFT é imediatamente aplicada. Por outro lado, no caso do EPVA, o processo é mantido até se obter o módulo do vetor de Park, que é diretamente representado num espectro de frequências para posterior análise.

Capítulo 5

Aquisição de dados experimentais e caracterização das avarias

Este capítulo apresenta em detalhe os equipamentos e materiais utilizados para a medição e obtenção dos dados necessários para o estudo. Apresenta também as várias situações de avaria que foram introduzidas nos rolamentos a analisar, onde são examinadas várias condições de funcionamento do MI, que serão descritas mais adiante.

5.1 Equipamento

O banco de ensaios está organizado em quatro categorias de sistemas e equipamentos: 1) os equipamentos de potência e controlo, que incluem o sistema trifásico de energia, autotransformador, motor de indução trifásico de rotor em gaiola de esquilo, dinamómetro de histerese e respetiva consola de controlo; 2) os instrumentos de medição e monitorização, como pinças amperimétricas, multímetros e placa de aquisição de dados; 3) o sistema de registo e análise de dados, que compreende um computador e *softwares* de aquisição e análise de dados; 4) os conectores e acessórios, que incluem cabos de ligação e acoplamentos. Durante os ensaios, o motor eléctrico é acionado a diversos níveis de trabalho. Os sinais da corrente eléctrica do estator são medidos a partir da fonte de alimentação. Para cada ensaio, os rolamentos com as diferentes avarias a analisar são substituídos.

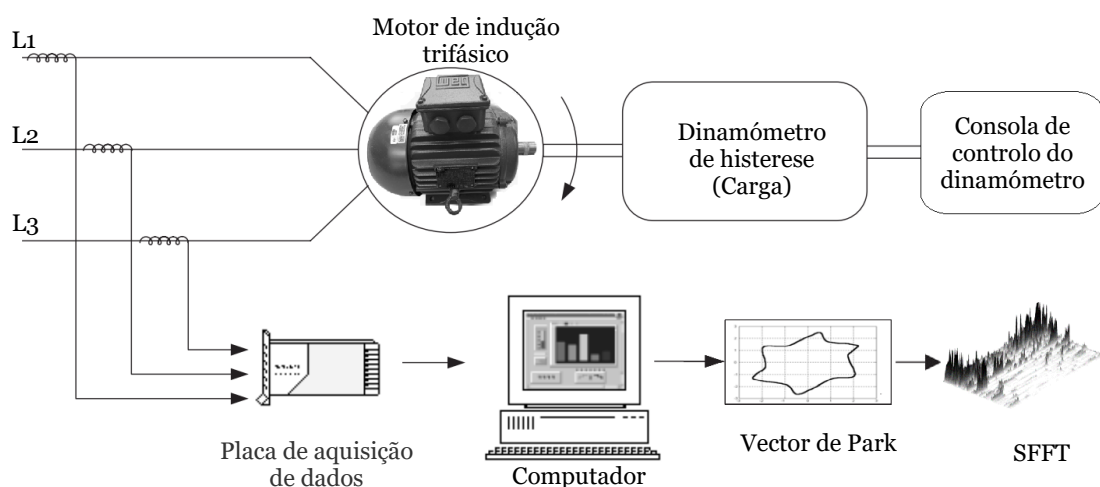


Figura 5.1 – Diagrama de blocos do sistema experimental implementado, adaptado de [95].

Na Figura 5.1 apresenta-se o diagrama de blocos que descreve a ligação dos equipamentos de potência e controlo, bem como, em paralelo, os sistemas de medição e análise das componentes elétricas obtidas nos ensaios experimentais para cada uma das avarias introduzidas nos rolamentos a analisar. Com a descrição geral previamente realizada sobre a composição do banco de ensaios, bem como a aquisição dos sinais elétricos exemplificada no diagrama de blocos, analisa-se a simplicidade do processo, que se revela muito vantajosa do ponto de vista económico, técnico e, sobretudo, da implementação em aplicações onde os métodos convencionais não são viáveis.

De seguida, cada conjunto de equipamentos e componentes que integram o banco de ensaios foi dividido em diferentes tabelas, onde são apresentadas as principais características, bem como uma descrição sucinta de cada um desses elementos. A Tabela 5.1 apresenta os componentes do sistema de potência e controlo.

Tabela 5.1 - Equipamento de potência e controlo

Equipamento	Descrição	Características
Autotransformador 	O autotransformador permite modificar o valor eficaz da tensão aos terminais do motor; foi introduzido entre a rede de distribuição e a alimentação do motor de indução trifásico.	Corrente nominal: 30 A
Motor de indução trifásico 	Máquina elétrica que converte energia elétrica em mecânica, utilizada para a análise de diferentes tipos de avarias. É um motor de baixa potência, muito versátil para fins de estudo.	Marca: WEG / W22 Premium Potência: 3 HP / 2200 W Binário: 14,64 Nm Velocidade: 1435 RPM Tensão/Corrente: 400 V/4,56 A Frequência: 50 Hz
Dinamómetro de histerese HD-815-8NA 	Permite o controlo do binário de carga aplicado ao motor; absorve a potência através da frenagem por histerese; sem atrito independentemente da velocidade do motor; é refrigerado por um ventilador.	Magtrol / Model HD-815-8NA Binário: 28 Nm Velocidade: 12000 RPM Momento de inércia: 1,19E-2 Kg.m ² Arrefecimento: Ar (Ventilador)
Consola de controlo do dinamómetro - DSP7001 	Processa sinais digitais para testes de motores, compatível com uma variedade de dinamómetros. Possui alarmes para potência, velocidade, binário e entradas externas [96].	DSP7000 High Speed Programmable Controller Par máximo: 99,999 unidades Velocidade máxima: 199,999 rpm Tensão: 85-264 VAC 50/60 Hz Potência necessária: 210 VA

Tabela 5.2 - Instrumentos de medição e aquisição de dados









Equipamento	Descrição	Características
<p>Multímetro</p> 	Um instrumento para medir várias grandezas elétricas, como a tensão, a corrente e a resistência	<p>Corrente CA: 600 A \pm (1,8% + 6); Tensão CC: 600 V \pm (0,6% + 3) Tensão CA: 600 V \pm (1% + 6); Resistência: 60 MOhm \pm (1% + 3) Frequência: 10 Hz ~ 10 MHz</p>
<p>Pinças amperimétricas</p> 	Aparelhos de medição para medir a corrente elétrica num condutor sem interromper o circuito elétrico	<p>Precisão: 0,1% Deslocamento de fase reduzido UL, Marca CE CNAS Gama de medição: 1 mA a 1200 A Medição de harmónicos EN 61010, 600V CAT III</p>
<p>Placa de aquisição de dados</p> 	É um dispositivo DAQ multifuncional de amostragem simultânea, para captar e digitalizar sinais elétricos [97].	<p>Fabricante: National Instruments Tipo: Dispositivo de E/S multifuncional Canais de entrada analógica: 8 diferenciais Canais de saída analógica: 2 Taxa de amostragem máxima: 2 MS/s por canal</p>

Tabela 5.3 - Sistemas de registo e análise de dados

Componente	Descrição	Características
<p>Computador</p> 	Utilizado para aquisição e processamento de dados, executando <i>softwares</i> de análise e monitorização dos ensaios em tempo real.	<p>Marca: ASUS Processador: AMD Ryzen 7 7730U com gráficos Radeon - 2.00 GHz RAM: 16 GB Sistema operativo: 64 bits, processador baseado em x64.</p>
<p>LabView 2014</p> 	É um ambiente de programação gráfica com aceleradores de produtividade únicos para o desenvolvimento de sistemas de teste, tais como uma abordagem intuitiva à programação [98].	<p>Aquisição de dados e instrumentos de controlo. Desenvolver com programação gráfica. Obter informações a partir dos dados. Monitorizar sistemas.</p>
<p>Matlab R2022b</p> 	Combina um ambiente de <i>desktop</i> otimizado para análise e <i>design</i> iterativos com uma linguagem de programação voltada para matemática matricial.	<p>Análise de Dados Gráficos Programação Interfaces de idiomas externos Computação paralela</p>

Os instrumentos de medição e aquisição de dados são descritos na Tabela 5.2; os elementos que compõem o sistema de registo e análise de dados são descritos na Tabela 5.3 e, finalmente, na Tabela 5.4, são listados os principais componentes de ligação utilizados para conectar os sistemas e equipamentos do banco de ensaios.

Tabela 5.4 - Conectores e acessórios

Componente	Descrição	Características
 <p>Acoplamento de fole metálico</p>	Acoplamento de precisão de fole metálico extremamente compacto com fixação por pinça integrada. Para 15 - 500 Nm.	Fabricante: R+W Para instalação em espaços reduzidos Leve e com baixo momento de inércia Fácil de montar
 <p>Cabos de conexão</p>	Interligam todos os equipamentos e asseguram a transmissão de sinais e de energia.	Interligam todos os equipamentos e asseguram a transmissão de sinais e de energia.

Uma vez descritos os diferentes sistemas, equipamentos, instrumentos e componentes do banco de ensaios, apresenta-se o resultado final na Figura 5.2, onde o banco de ensaios já integra cada um dos elementos referidos. Para além dos componentes mencionados, foram utilizadas as ferramentas mecânicas apropriadas para a montagem e desmontagem dos rolamentos, permitindo a substituição dos mesmos durante os testes.

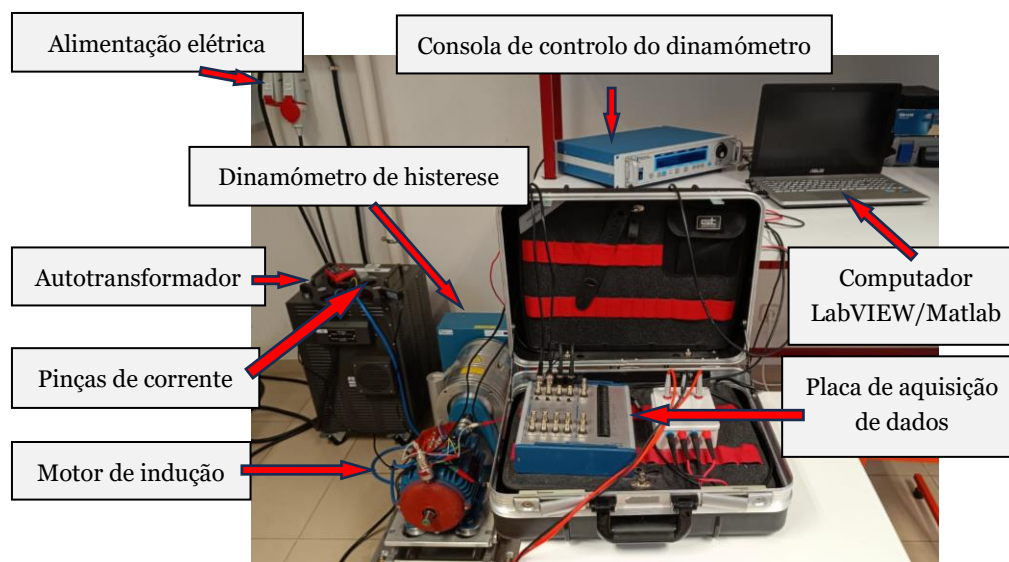


Figura 5.2 – Bancada de ensaios laboratoriais.

Os ensaios foram efetuados no Laboratório de Sistemas Electromecatrónicos (LSE) do Centro de Investigação em Sistemas Electromecatrónicos (CISE).

5.2 Caracterização das avarias nos rolamentos

O motor WEG de 2200 W descrito anteriormente utiliza um arranjo de dois rolamentos rígidos de esferas. Na extremidade não motora, é utilizado um rolamento SKF 6205-2Z e na extremidade motora é aplicado um rolamento SKF 6206-2Z, conforme mostrado na Figura 5.3. As características geométricas e dimensionais estão detalhadas na Tabela 5.5.

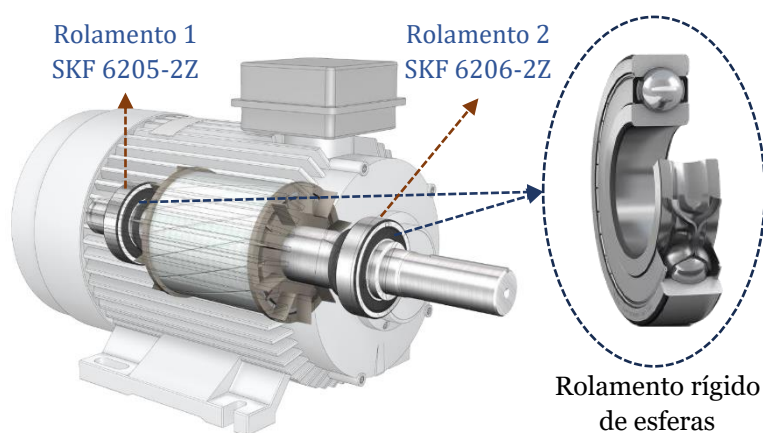


Figura 5.3 – Disposição dos rolamentos no MI ensaiado, adaptado de [99].

Tabela 5.5 - Características dos rolamentos SKF 6205-2Z e SKF 6206-2Z

Características geométricas	SKF6205-2Z	SKF 6206-2Z
Diâmetro externo (D) [mm]	52 mm	62 mm
Diâmetro interno (d) [mm]	25 mm	30 mm
Largura (B) [mm]	15 mm	16 mm
Diâmetro primitivo (Dp) [mm]	39.04 mm	46 mm
Diâmetro do corpo rolante (Dcr) [mm]	7.94 mm	9.52 mm
Número de esferas (n)	9	9
Ângulo de contacto (β) [°]	0°	0°

Os diferentes modos de avarias foram descritos no capítulo 3, concluindo-se que existem diversos fatores que causam avarias prematuras nos rolamentos, a maioria dos quais é provocada por uma lubrificação inadequada, fadiga, desgaste, desalinhamento, sobrecargas e contaminação. Para além disso, a utilização crescente de variadores de frequência ou *Variable Frequency Drives* (VFDs) em MIs, promovida por vantagens como a poupança de energia e o controlo preciso da velocidade e do binário, introduz novos desafios. Os VFDs geram componentes harmónicos adicionais na corrente do estator e tensões de modo comum provocadas por harmónicos de baixa frequência, que podem induzir avarias nos rolamentos devido a electroerosão (EDM) e oscilações de carga, manifestando-se nas

superfícies dos rolamentos sob a forma de fissuras e estrias. As correntes induzidas nos rolamentos são consideradas a principal causa destes danos, o que eventualmente conduz a avarias prematuras [100], [101].

Para simular estas avarias nos rolamentos, foram analisados três rolamentos danificados. Dois deles, um no extremo motor e outro no extremo não motor, apresentam um furo de $\text{Ø}2$ mm na sua pista externa, enquanto o terceiro rolamento danificado posicionado no lado não motor (posição do rolamento 1), possui danos localizados causados por descargas elétricas (ED) tanto no anel exterior como no interior, representando o *pitting* típico destas avarias.

A Figura 5.4 mostra os primeiros 2 rolamentos com um furo de $\text{Ø}2$ mm na pista exterior do rolamento. Este furo simula defeitos localizados, tais como fissuras ou *pitting* que se podem formar devido à fadiga do material ou contaminação. Este tipo de avaria artificial é a mais comum que tem sido utilizada em vários estudos para a sua investigação, onde os furos feitos artificialmente em rolamentos variam de $\text{Ø}1,5$ mm a $\text{Ø}8$ mm, representando avarias moderadas e graves, dependendo do tamanho do furo. Alguns destes estudos encontram-se em [10], [28], [72], [73].



Figura 5.4 – Avarias 1 e 2 - furo de $\text{Ø}2$ mm na pista exterior nos rolamentos 1 e 2.

A terceira avaria, mostrada na Figura 5.5, representa o *pitting* não uniformemente distribuído na pista interna e externa, caracterizada pela corrosão resultante principalmente do desgaste irregular ou de avarias graves de contacto, como as causadas por partículas contaminantes presas no rolamento ou devidas a ED, causando o fenómeno conhecido como *pitting*, ou em períodos mais longos de exposição a estas descargas a formação de *fluting*.



Figura 5.5 – Avaria 3 - *pitting* produzido por ED.

Capítulo 6

Análise e discussão dos resultados

6.1 Introdução

Este capítulo centra-se no tratamento e análise dos sinais obtidos a partir da corrente estatórica, utilizando o banco de ensaios descrito no capítulo anterior. Para a obtenção dos dados experimentais necessários, foram consideradas as condições gerais de funcionamento apresentadas na Tabela 6.1. Estes parâmetros e condições de funcionamento foram mantidos em cada um dos ensaios realizados.

Tabela 6.1 - Parâmetros e condições de funcionamento dos ensaios experimentais

Parâmetros/condições de funcionamento	Estado/valor	
Tensão	400 V (Valor eficaz, entre fases)	
Frequência	50 Hz	
Corrente nominal	4,5 A	
Tipo de Ligação	Estrela	
Carga	Sem carga	0 Nm
	Meia Carga	7 Nm
	Plena Carga	14 Nm
Velocidade	1499 rpm, 1473 rpm, 1443 rpm; sem carga, meia e plena carga, respetivamente	

No total, foram efetuados quatro ensaios. O primeiro corresponde a testar o sistema em condições saudáveis, ou seja, os rolamentos não apresentam qualquer tipo de avaria. De seguida, os ensaios foram realizados introduzindo os diferentes tipos de avarias, caracterizados no capítulo anterior, o que apresenta um total de três condições de avaria. Como já foi definido no capítulo 4, são aplicados os métodos da STFT e do EPVA para a análise de cada conjunto de dados obtidos. Estes métodos, que estão englobados dentro de um grande conjunto de técnicas avançadas de processamento de sinais, desenvolvem análises nos domínios da frequência e da frequência-tempo, respetivamente. Inicialmente, os sinais são analisados através da aplicação individual de cada um destes métodos. Posteriormente, introduz-se o conceito de hibridização, onde se pretende realizar uma análise híbrida envolvendo os dois métodos, com o objetivo de investigação de desenvolver e experimentar esta combinação, visando obter resultados com uma maior fiabilidade.

6.2 Análise através da STFT

Para a aplicação desta técnica, foram definidos os parâmetros da STFT necessários para a análise espectral. Estes parâmetros variam consoante a aplicação. Acima de tudo, deve ter-se em conta o que se pretende priorizar mais, seja a análise temporal, seja a análise de frequência. A escolha da janela é importante, pois representa o compromisso entre a largura do lóbulo principal e a amplitude da banda lateral no domínio da frequência [77].

A Tabela 6.2 mostra os dados dos parâmetros utilizados na análise da STFT.

Tabela 6.2 – Parâmetros na análise STFT

Parâmetros	Valor / Atribuição
Frequência de amostragem (Fs)	10 000
Número da amostra de entrada (n)	12288
Número total de pontos FFT (N)	6144
Tipo de função de janela espectral	Janela <i>Blackman</i>
Tamanho do salto (H)	6144

6.2.1 Funcionamento saudável

A análise de rolamentos em condições saudáveis é o primeiro passo, que nos permitirá compreender o seu comportamento, obter as suas principais características e depois poder fazer comparações com cada tipo de avaria sujeita a experimentação. Para a análise, são consideradas as correntes elétricas das três fases de alimentação do motor, que possuem conteúdo espectral idêntico. Assim, através da aplicação da STFT, a análise de uma de suas fases é suficiente para obter o espectrograma frequência-tempo.

A Figura 6.1 apresenta 3 espectrogramas, cada qual correspondente a um nível de carga distinto. A Figura 6.1 (a) mostra o espectrograma obtido para o funcionamento sem carga. A representação das frequências é muito clara e esperada. Observa-se a predominância da frequência de alimentação da rede de 50 Hz e a presença dos respetivos harmónicos de 150 Hz, 250 Hz e 350 Hz. A Figura 6.1 (b) representa a operação a meia carga, onde se observa a frequência da rede e os respetivos harmónicos. Porém, este modo de operação apresenta uma particularidade, já que a presença de 2 frequências muito marcadas em torno de 38 Hz e 62 Hz é claramente perceptível. Estas frequências serão analisadas posteriormente, na presença de avaria, de forma a determinar se tais componentes se manifestam dentro de cada avaria e qual poderá ser uma das suas principais causas.

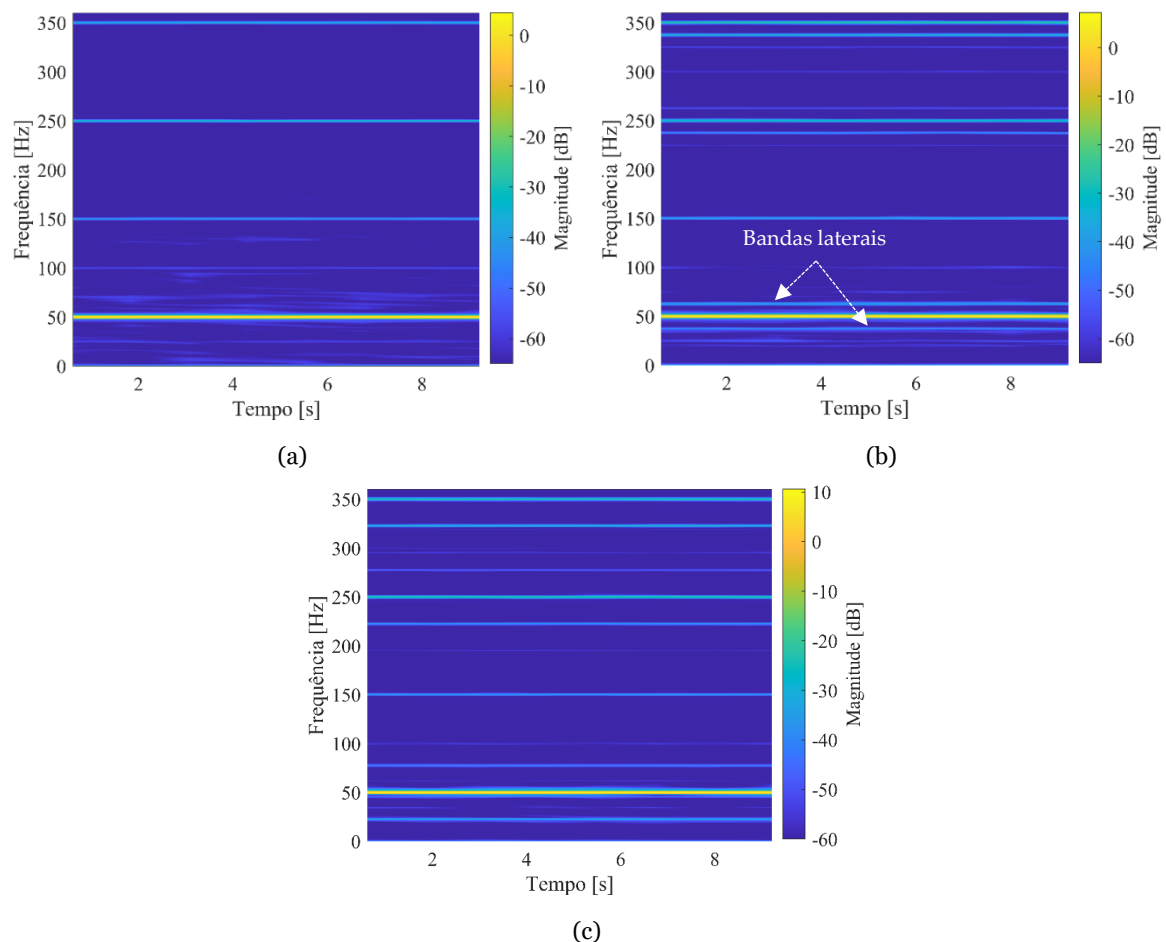


Figura 6.1 – STFT para funcionamento saudável: (a) Sem carga; (b) Meia carga; (c) Plena carga.

A Figura 6.1 (c) mostra o espectrograma do funcionamento a plena carga, onde, em geral, se verifica um aumento de energia das frequências já referidas na Figura 6.1 (a), podendo ainda observar-se um aumento de energia em torno das frequências de 25 Hz, 75 Hz, 225 Hz, 275 Hz e 325 Hz. Neste caso, as frequências que apareciam no funcionamento a meia carga já não estão presentes.

Em conclusão, no estado de funcionamento saudável do motor, observou-se, para cada nível de carga, que os espectrogramas se apresentam de forma clara e consistente. A frequência fundamental e os seus harmónicos associados não mostram qualquer tipo de distorção ou variação significativa na sua energia. Além disso, não foram identificadas frequências adicionais, exceto as bandas laterais já referidas na análise a meia carga. Embora estas características indiquem, neste estudo, um funcionamento aparentemente normal, é importante observar que a presença de harmónicos a 150 Hz e harmónicos relacionados pode ser um indicativo de outras avarias, como curto-circuitos ou desequilíbrios na alimentação.

6.2.2 Análise das avarias através da STFT

Para a análise de avarias em rolamentos através da análise espectral da corrente elétrica do estator, analisamos a equação (4.4), apresentada e analisada no capítulo 4. Esta equação estabelece que, para além da frequência da rede e dos seus harmónicos correspondentes, a presença de uma avaria em rolamentos induz o surgimento de frequências adicionais que indicam a presença destas avarias. Esta equação é novamente apresentada de seguida:

$$f_{bng} = |f_s \pm k f_n|$$

em que f é a frequência de alimentação da rede (50 Hz), f_n representa as frequências características dos componentes do rolamento, que podem ser qualquer uma das 4 frequências naturais obtidas pelas equações (2.2), (2.3), (2.4) e (2.5), e k assume os valores de 1, 2, 3, Os valores das frequências naturais ou características dos rolamentos do motor são apresentados na Tabela 6.3 e na Tabela 6.4. De referir que, para cada nível de carga, as frequências naturais variam devido à variação da velocidade mecânica do motor.

Tabela 6.3 – Frequências correspondentes ao rolamento SKF 6205-2Z

Nível de carga	Frequências características em [Hz]			
	Pista externa f_{bor}	Pista interna f_{bir}	Corpos rolantes f_{bs}	Gaiola f_{ft}
Sem carga	89.566	135.284	58.896	9.952
Meia carga	88.072	133.028	57.913	9.786
Plena Carga	86.279	130.321	56.735	9.587

Tabela 6.4 – Frequências correspondentes ao rolamento SKF 6206-2Z

Nível de carga	Frequências características em [Hz]			
	Pista externa f_{bor}	Pista interna f_{bir}	Corpos rolantes f_{bs}	Gaiola f_{ft}
Sem carga	89.146	135.704	57.741	9.905
Meia carga	87.659	133.441	56.778	9.74
Plena Carga	85.875	130.725	55.622	9.542

A primeira avaria analisada corresponde ao furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento 1 (SKF 6205-2Z), cuja análise é apresentada na Figura 6.2. A Figura 6.2 (a) mostra o espectrograma da corrente de fase em estado saudável a meia carga, enquanto a Figura 6.2 (b) mostra o espectrograma obtido na presença de avaria. Da comparação entre os dois espectrogramas, podemos realizar a primeira análise comparativa entre estes 2 estados sob a mesma condição de carga. Analisando o espectrograma relativo à condição de funcionamento saudável, observa-se que a frequência fundamental, bem como os seus harmónicos estão presentes e permanecem uniformes ao longo do tempo. Para além disso, como foi analisado anteriormente, observa-se a presença de 2 bandas laterais muito

marcadas em torno da frequência fundamental e que se replicam com a mesma intensidade nos harmônicos de 250 Hz e 350 Hz. Todas estas frequências estão bem definidas, sem qualquer distorção ou descontinuidade ao longo do tempo.

No que diz respeito à condição de avaria, representada na Figura 6.2 (b), mantêm-se todas as frequências observadas na condição saudável, bem como as bandas laterais, geralmente associadas a problemas de desalinhamento mecânico, ou devido à ação da mesma carga aplicada. Estando estas componentes presentes tanto na condição saudável, como na condição de avaria, conclui-se que estas não estão associadas à avaria do próprio rolamento. Ainda assim, a sua presença dificulta a identificação das frequências correspondentes à avaria, uma vez que as frequências características do rolamento podem coincidir ou estar próximas destas bandas laterais, o que dificultaria a sua localização e análise. A Tabela 6.5 mostra as frequências características da pista exterior do rolamento 1, onde as frequências que poderiam estar presentes no espectrograma são indicadas. A frequência de 138 Hz é claramente evidente no espectrograma, como indicado na Figura 6.2 (b); já a frequência em torno de 226 Hz apresenta um aumento de energia durante os primeiros 4 segundos, e depois tende a diminuir de energia, pelo que após este tempo deixa de ser visível; a frequência em torno de 38 Hz está tão próxima de uma das bandas laterais que se torna difícil de analisar.

Outro aspeto notório é o aumento das bandas laterais em torno das frequências de 250 Hz e 350 Hz. Tal acontece porque, no estado de avaria, e especificamente neste caso em que se analisa um furo na pista externa, geram-se irregularidades na rotação do eixo do motor, desencadeando um aumento da vibração ou desalinhamento do entreferro, o que pode causar correntes parasitas e até aumentar o deslizamento no motor. Tais alterações refletem-se, assim, nestas variações ou aumentos na largura das bandas laterais em torno destes harmônicos. As características observadas não são muito acentuadas, mas alertam-nos claramente para a presença de avarias no motor como fissuras ou *pitting* que este orifício simula, mas sem atingir um estado grave de avaria.

Tabela 6.5 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente elétrica do estator, para o rolamento SKF 6205-2Z, a meia carga.

	$f_s = 50 \text{ Hz}$	$f_n = f_{bor} = 88.072 \text{ Hz}$	
$f_{STFT} = f_s + kf_n $	K=-1	K=1	K=2
Frequências [Hz]	38.072	138.072	226.144

Os espectrogramas apresentados na Figura 6.2 (c) e na Figura 6.2 (d) mostram o estado saudável e a condição de avaria, respetivamente, em funcionamento a plena carga. No estado saudável, o espectrograma é muito claro, observando-se a presença da frequência de alimentação da rede e os respetivos harmônicos. Relativamente ao estado de avaria, todas essas frequências são mantidas, constatando-se ainda um aumento de energia no

espectrograma. Somado a isso, é perceptível uma maior largura de banda ou modulações nos harmônicos presentes, que são mais evidentes nas frequências de 250 Hz e 350 Hz. Para além disso, observa-se claramente um aumento da energia nas bandas laterais em torno da frequência fundamental, conforme indicado no espectrograma. Ao contrário da análise a meia carga, onde são observadas frequências associadas à avaria, a condição de plena carga não permite detetar a presença de frequências características ligadas à degradação da pista externa do rolamento.

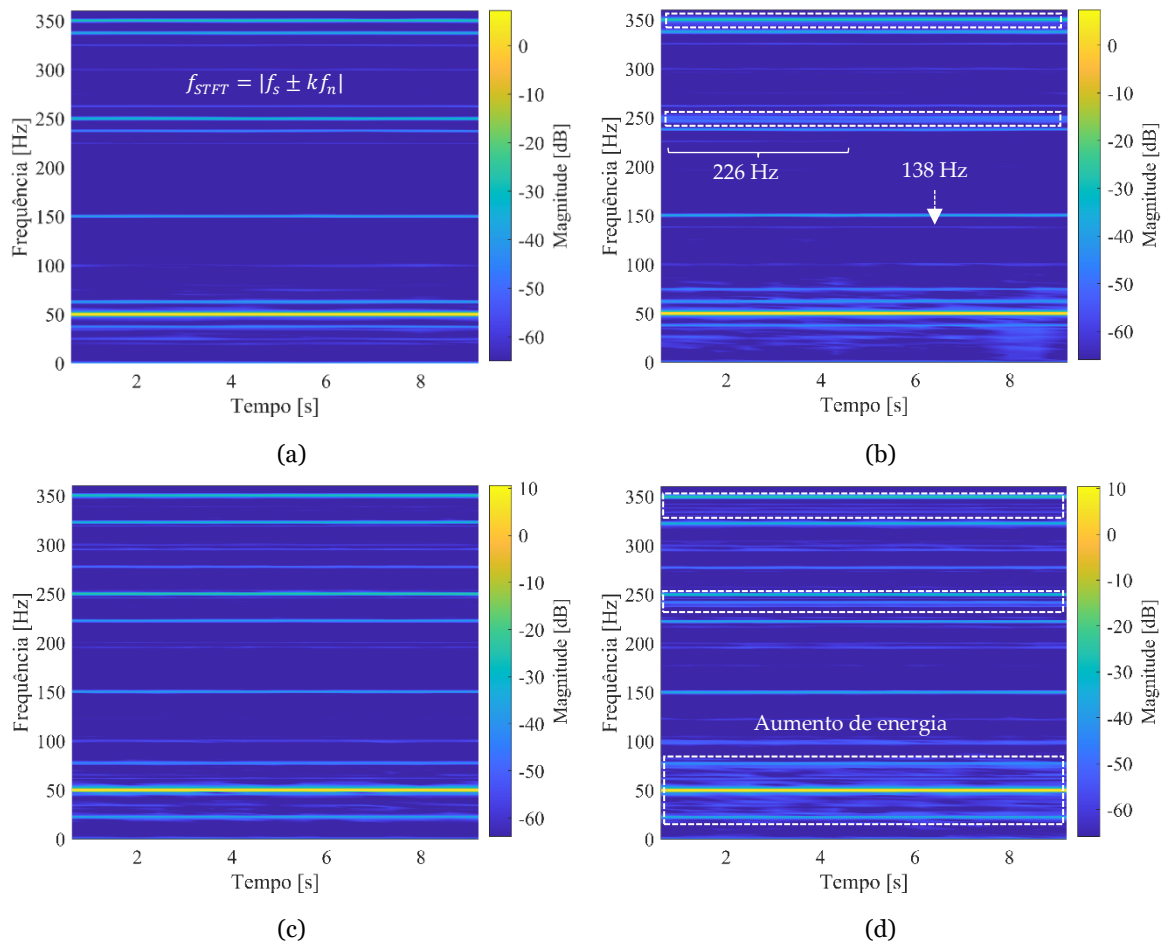


Figura 6.2 – STFT aplicada às correntes de alimentação do MI, considerando estado saudável e furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento SKF 6205-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.

À semelhança da análise anterior, a Figura 6.3 mostra 4 espectrogramas, onde a Figura 6.3 (a) e a Figura 6.3 (c) correspondem ao funcionamento saudável do sistema, tanto a meia carga como a plena carga, enquanto a Figura 6.3 (b) e a Figura 6.3 (d) mostram os espectrogramas da condição de avaria a meia carga e a plena carga, respetivamente. Neste caso, a avaria analisada corresponde ao furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento do lado motor (rolamento 2 - SKF 6206-2Z). A análise sob a condição saudável já foi efetuada e discutida anteriormente. Por essa razão, o foco é colocado na condição de avaria em meia

carga, onde são evidentes os mesmos padrões já obtidos na avaria anterior. Nesta análise, os aumentos de energia são mais perceptíveis, tal como a largura das bandas, como indicado no espectrograma. As frequências associadas à avaria para o segundo rolamento estão descritas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente elétrica do estator, para o rolamento SKF 6206-2Z, a meia carga e plena carga.

$f_s = 50 \text{ Hz}$			
Meia carga		$f_n = f_{bor} = 87.66 \text{ Hz}$	
$f_{STFT} = f_s + kf_n $	K=-1	K=1	K=2
Frequências [Hz]	37.66	137.66	225.32
Plena carga		$f_n = f_{bor} = 85.88 \text{ Hz}$	
$f_{STFT} = f_s + kf_n $	K=-1	K=1	
Frequências [Hz]	35.88	135.88	

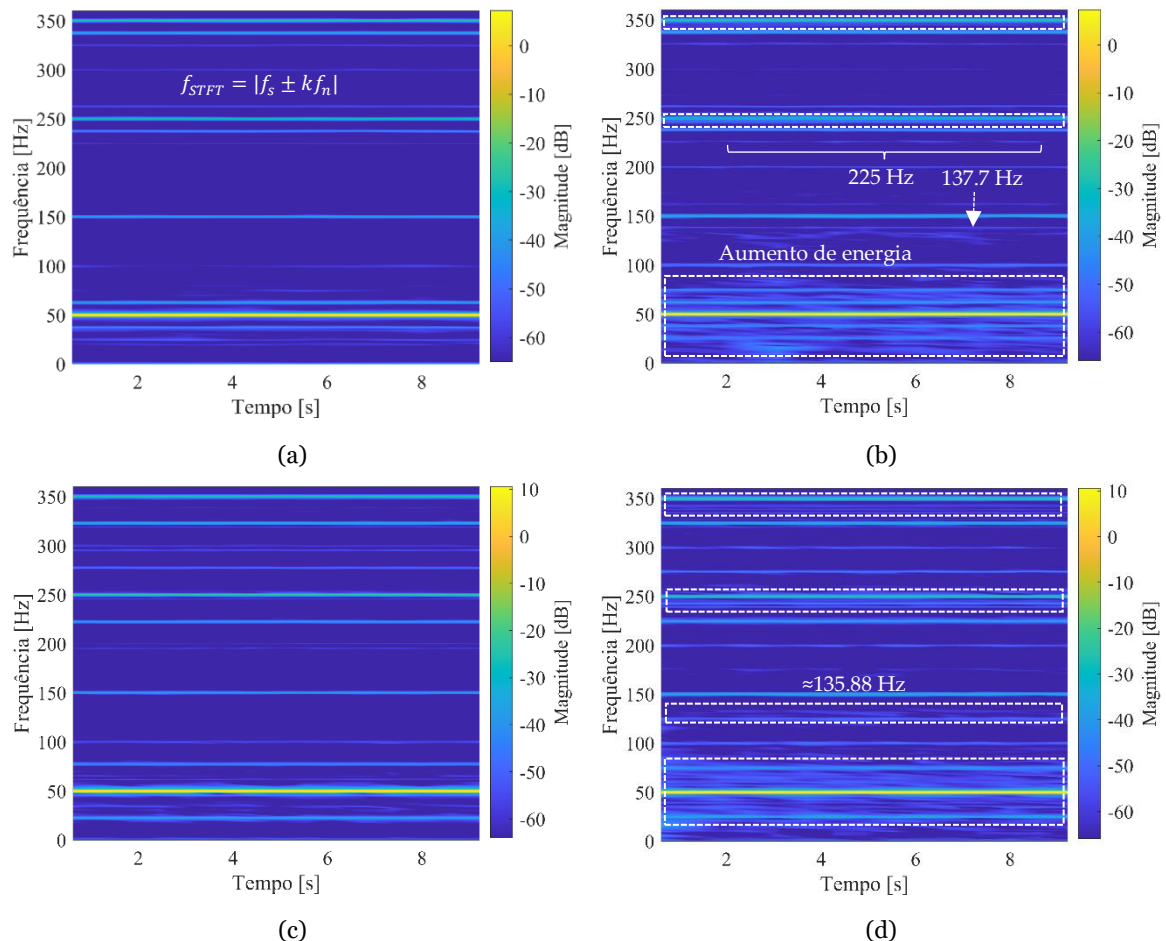


Figura 6.3 – STFT aplicada às correntes de alimentação do MI, considerando estado saudável e furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento SKF 6206-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.

O espectrograma relativo à segunda avaria, com o MI em funcionamento a plena carga, é mostrado na Figura 6.3 (d). Os aumentos de energia são claramente perceptíveis nas regiões marcadas no espectrograma, sendo tais aumentos particularmente evidentes nas baixas frequências em torno da frequência fundamental e nos harmônicos de 250 Hz e 350 Hz. Para além disso, observam-se, neste espectrograma, aumentos de energia em torno de 135,8 Hz, que é a frequência característica da pista externa quando o MI opera a plena carga.

De um modo geral, tanto no funcionamento a meia carga como a plena carga, os resultados são muito semelhantes àqueles obtidos na primeira avaria, pois a condição de avaria é idêntica, com a única diferença de que nesta análise o rolamento com avaria se encontra no lado motor. Por se encontrar no lado motriz, este rolamento suporta maiores tensões mecânicas do que o rolamento no lado não motriz. As análises realizadas efetivamente corroboram que, neste rolamento, os sintomas e aumentos de energia associados a frequências naturais dos componentes do rolamento são mais perceptíveis.

A terceira condição de avaria, referente ao *pitting* por descargas elétricas, é apresentada na Figura 6.4. À semelhança das análises anteriores, são avaliados quatro espectrogramas: a Figura 6.4 (a) e a Figura 6.4 (c) apresentam espectrogramas referentes ao estado saudável, enquanto os espectrogramas da Figura 6.4 (b) e da Figura 6.4 (d) mostram a condição de avaria a meia carga e a plena carga, respetivamente. Neste caso, a avaria é diferente das anteriores, uma vez que as primeiras 2 avarias representam um único furo, localizado na pista exterior do rolamento; já a avaria estudada aqui consiste em *pitting* ao longo das pistas exterior e interior do mesmo.

Na análise do espectrograma da Figura 6.4 (b), observa-se claramente um aumento geral de energia nas frequências entre 0 e 180 Hz, que inclui as frequências características tanto da pista exterior como da pista interior do rolamento, conforme apresentado na Tabela 6.7. No entanto, neste espectrograma, é difícil detetar eficazmente estas frequências associadas à avaria devido a este aumento generalizado da energia. Além disso, ao contrário das primeiras análises, os harmônicos de 250 Hz e 350 Hz não apresentam aumentos significativos ou perceptíveis na largura de banda.

Tabela 6.7 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente elétrica do estator, para o rolamento SKF 6205-2Z, a meia carga e plena carga, nas pistas exterior e interior.

$f_s = 50 \text{ Hz}$		
Meia carga	$f_n = f_{bor} = 88.072 \text{ Hz}$	$f_n = f_{bir} = 133 \text{ Hz}$
$f_{STFT} = f_s + kf_n $	K=1	K=1
Frequências [Hz]	138.072	183
Plena carga	$f_n = f_{bor} = 86.3 \text{ Hz}$	$f_n = f_{bir} = 130.3 \text{ Hz}$
$f_{STFT} = f_s + kf_n $	K=1	K=1
Frequências [Hz]	136.3	180.3

A análise a plena carga é apresentada na Figura 6.4 (d), onde se observa um comportamento semelhante ao da análise a meia carga, com ligeiras perturbações e variações na amplitude de algumas linhas espectrais a baixas frequências - principalmente em torno da frequência de alimentação (50 Hz). Este comportamento indica um aumento da vibração e perturbações na corrente do estator, que afetam o comportamento dinâmico do motor, gerando estas distorções no espectrograma.

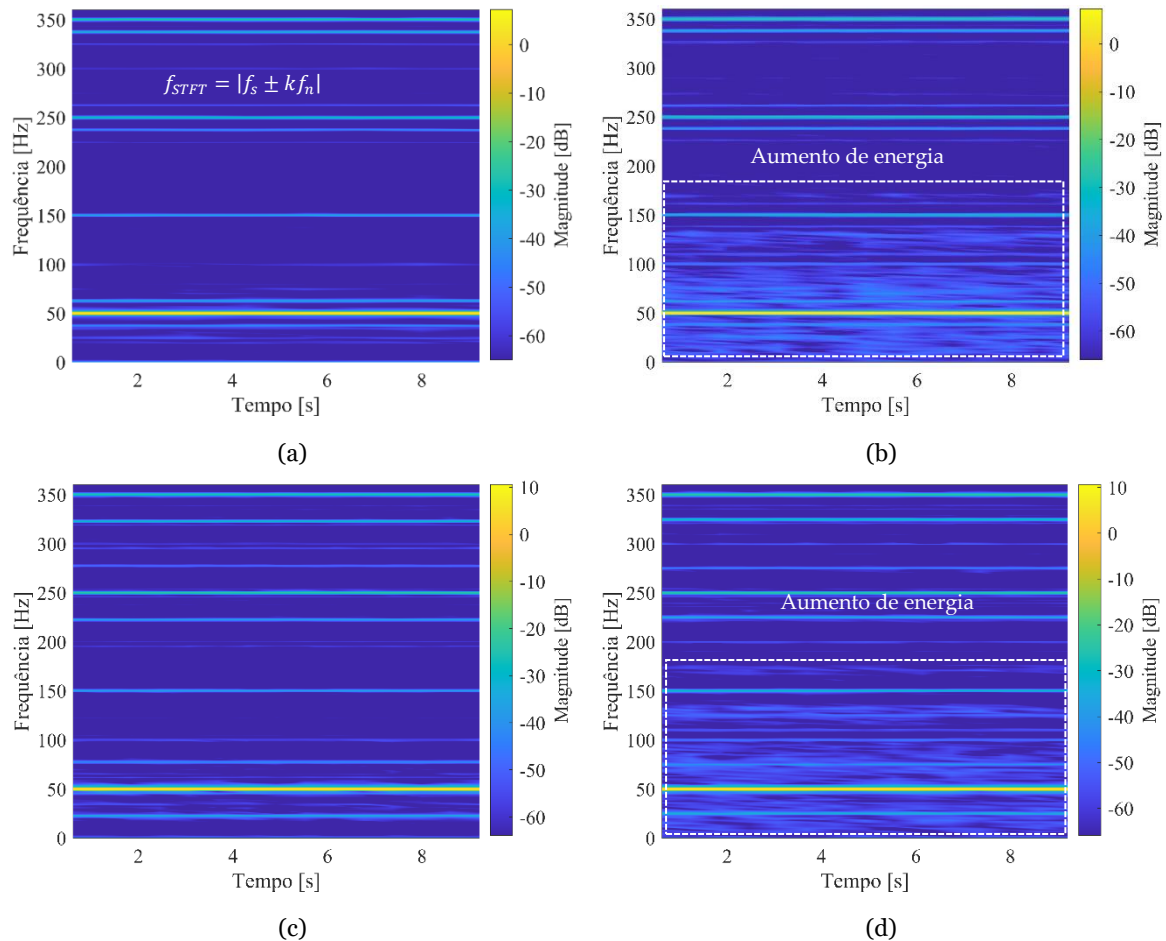


Figura 6.4 – STFT aplicada às correntes de alimentação do MI, considerando estado saudável e *pitting* por ED no rolamento SKF 6205-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.

Na Figura 6.5, analisa-se a amplitude da frequência característica da pista externa (86-89 Hz), em função do nível de carga, para cada caso de estudo apresentado. Verifica-se um aumento de energia nos três casos de avarias analisadas, sendo que a avaria do furo de Ø2 mm no rolamento do lado de ataque, e a avaria por descargas elétricas no rolamento do lado não motriz, foram as que apresentaram maior aumento de energia, o que também foi visualizado nos espectrogramas já analisados anteriormente.

Outro aspeto a considerar é que o comportamento da variação de energia em função do nível de carga apresenta a mesma tendência em todos os ensaios. Curiosamente, para os estados

de funcionamento a meia carga, foi obtido o maior aumento de energia. Isto deve-se ao facto de, sob este nível de carga, existir a presença de bandas laterais comumente relacionadas com problemas de desalinhamento, ou pela ação da mesma carga aplicada, e devido à sua proximidade com as frequências de avaria, acabando assim por gerar este aumento mais significativo de energia.

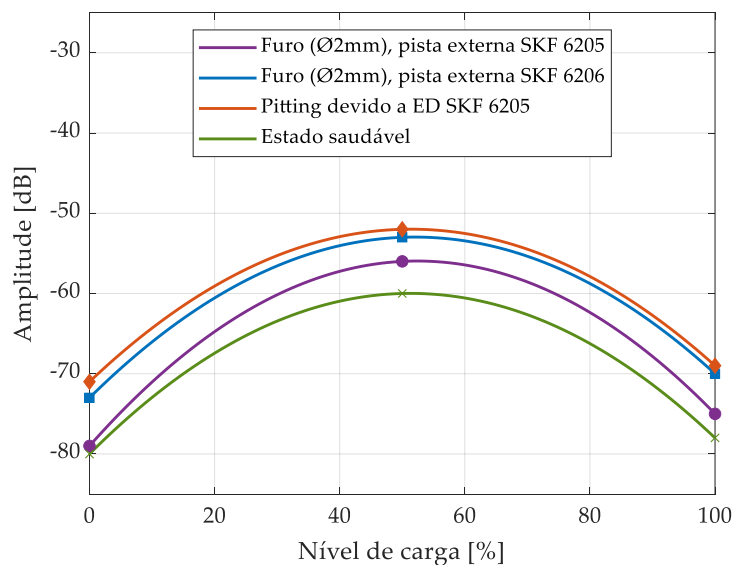


Figura 6.5 – Amplitude da frequência característica da pista externa do rolamento (f_{bor}) em função do nível de carga, através da STFT.

Em resumo, o método foi eficaz no diagnóstico destas avarias em todos os casos, sendo a avaria 2 a que apresentou melhores resultados no espectrograma, onde foi possível observar aumentos de energia nas frequências relacionadas com a avaria, bem como aumentos de energia muito acentuados nas baixas frequências e em alguns harmónicos. De um modo geral, os melhores resultados foram obtidos em funcionamento a meia carga e a plena carga, sendo que nos ensaios sem carga não foram detetadas características importantes relacionadas com a avaria. Os espectrogramas obtidos para condição de funcionamento sem carga são apresentados no apêndice A, Figura A.1, Figura A.2, Figura A.3 e Figura A.4.

6.3 Análise através do método EPVA

Ao contrário do método STFT, o método EPVA avalia a informação das três correntes do estator, que são transformadas nas respetivas componentes I_d e I_q , conforme detalhado no capítulo 4. Estas componentes são utilizadas para obter o módulo do vetor de Park, cuja componente AC é representada no espectro de frequências. Procura-se identificar aumentos

ou picos de energia nas frequências características do rolamento. Estas frequências são definidas de acordo com a equação (4.15), apresentada novamente abaixo:

$$f_{EPVA} = k * f_n$$

No laboratório, a informação das correntes das fases 1 e 2 é recolhida, sendo a terceira deduzida através destas duas, uma vez que num sistema equilibrado de correntes trifásicas, a soma vetorial destas 3 correntes é nula. Estes dados foram processados no software Matlab R2022b, aplicando as transformações descritas no capítulo 4. A frequência de amostragem para esta análise é de 50 kHz, para uma janela temporal de 10 s, resultando num total de 500.000 pontos processados.

Os resultados são analisados em paralelo entre a condição saudável e de cada uma das avarias avaliadas neste estudo. Com base nas conclusões obtidas anteriormente, utilizando o STFT, o foco de análise apresentada a seguir é colocado na operação em meia e plena carga. Os espectrogramas obtidos para a condição de funcionamento sem carga são apresentados no Apêndice A, Figura A.5, Figura A.6, Figura A.7 e Figura A.8.

Na Figura 6.6 (a), apresenta-se o espectrograma para o funcionamento sem avaria, a meia carga. As principais frequências observadas são aquelas associadas ao harmónico fundamental, bem como as bandas laterais que foram observadas na análise por STFT. Também aqui essas bandas são apreciáveis, especificamente em 12,7 Hz e 287,4 Hz. Agora na Figura 6.6 (b), apresenta-se o espectrograma para o estado de avaria. Mantêm-se as frequências descritas no estado saudável, com a diferença de que se nota um aumento considerável de energia, nomeadamente nos harmónicos a 100 Hz e 300 Hz. No que diz respeito às frequências das bandas laterais, estas continuam presentes no estado de avaria, apesar de não apresentarem qualquer alteração significativa na sua energia, o que valida a análise através do primeiro método STFT, de que estas frequências não estão ligadas a avarias de rolamentos propriamente ditas, mas sim a desequilíbrios no sistema ou à ação da própria carga.

Tabela 6.8 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA, do rolamento SKF 6205-2Z, a meia e plena carga.

$f_s = 50 \text{ Hz}$		
Meia carga	$f_n = f_{bor} = 88.072 \text{ Hz}; \quad n = 1474 \text{ rpm}$	
$f_{EPVA} = k * f_n$	K=1	K=3
Frequências [Hz]	88	264
Plena carga	$f_n = f_{bor} = 86.3 \text{ Hz}; \quad n = 1443 \text{ rpm}$	
$f_{EPVA} = k * f_n$	K=1	K=3
Frequências [Hz]	86.3	259

A Tabela 6.8 mostra as frequências características da pista exterior do rolamento SKF 6205-2Z. Estas são as frequências esperadas em função do nível de carga, que aumentará a energia no espectrograma. Como indicado em cada espectrograma, no estado de avaria a meia carga, pequenos aumentos de energia em torno dessas frequências são mais facilmente observados, especificamente quando k é igual a 1 e 3.

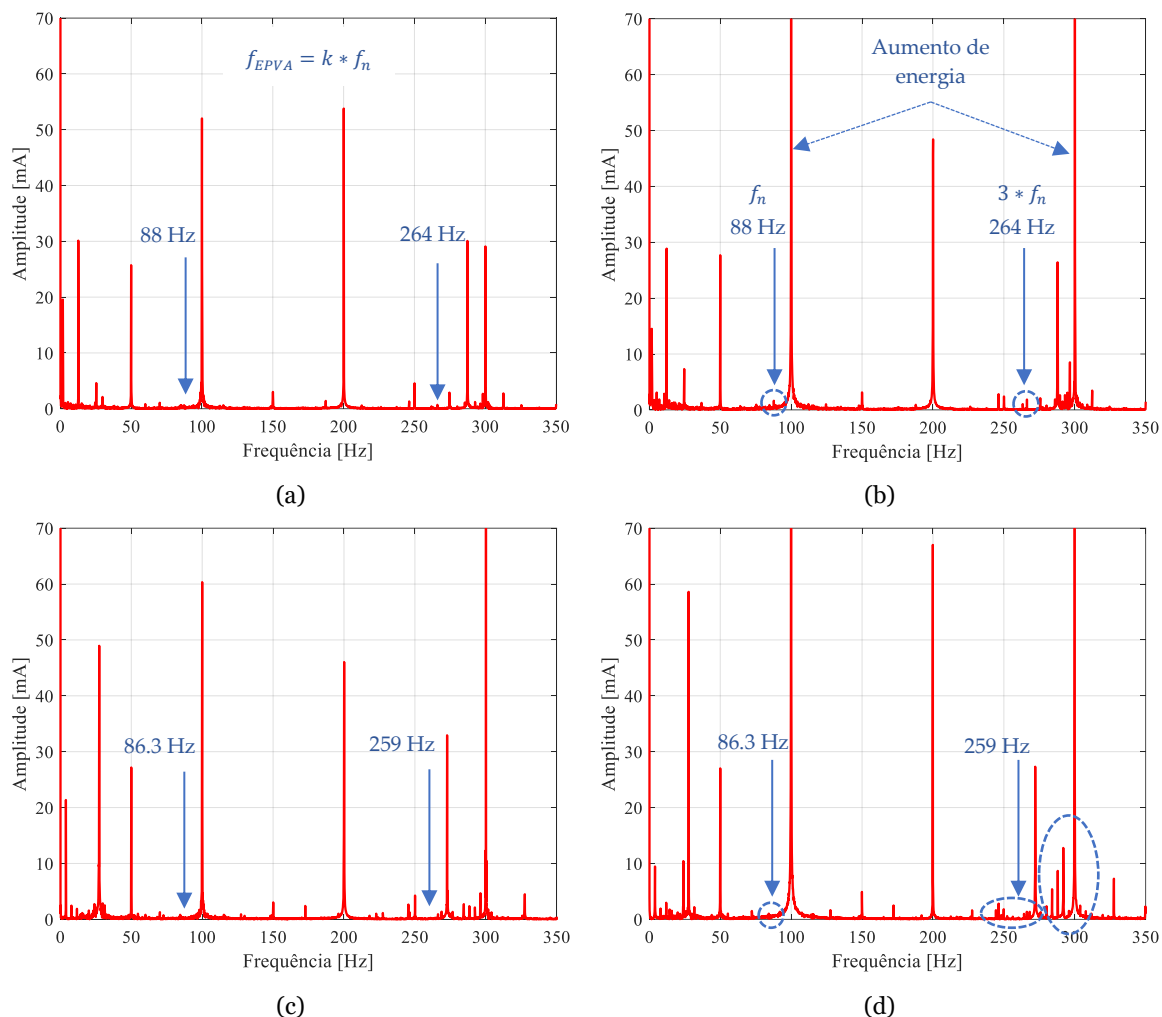


Figura 6.6 – Assinatura do EPVA para o estado saudável e para furo de $\varnothing 2$ mm na pista exterior do rolamento SKF 6205-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.

Na Figura 6.6 (c) e Figura 6.6 (d), compara-se o estado sem avaria e com avaria em plena carga, respetivamente. Também aqui se observa um notável aumento de energia nas frequências de 100 Hz e, especialmente, na de 300 Hz. Em acréscimo, observam-se aumentos de energia em bandas laterais em torno desta frequência, como mostra a Figura 6.6 (d). Neste estado, os aumentos de energia associados às frequências indicadas na Tabela 6.8 e no próprio espectrograma não foram tão perceptíveis quanto na condição de funcionamento de meia carga.

Tabela 6.9 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA, associadas ao rolamento SKF 6206-2Z, a meia e plena carga.

$f_s = 50 \text{ Hz}$		
Meia carga	$f_n = f_{bor} = 87.7 \text{ Hz}; \quad n = 1474 \text{ rpm}$	
$f_{EPVA} = k * f_n$	K=1	K=3
Frequências [Hz]	87.7	263
Plena carga	$f_n = f_{bor} = 85.9 \text{ Hz}; \quad n = 1443 \text{ rpm}$	
$f_{EPVA} = k * f_n$	K=1	K=3
Frequências [Hz]	85.9	257.7

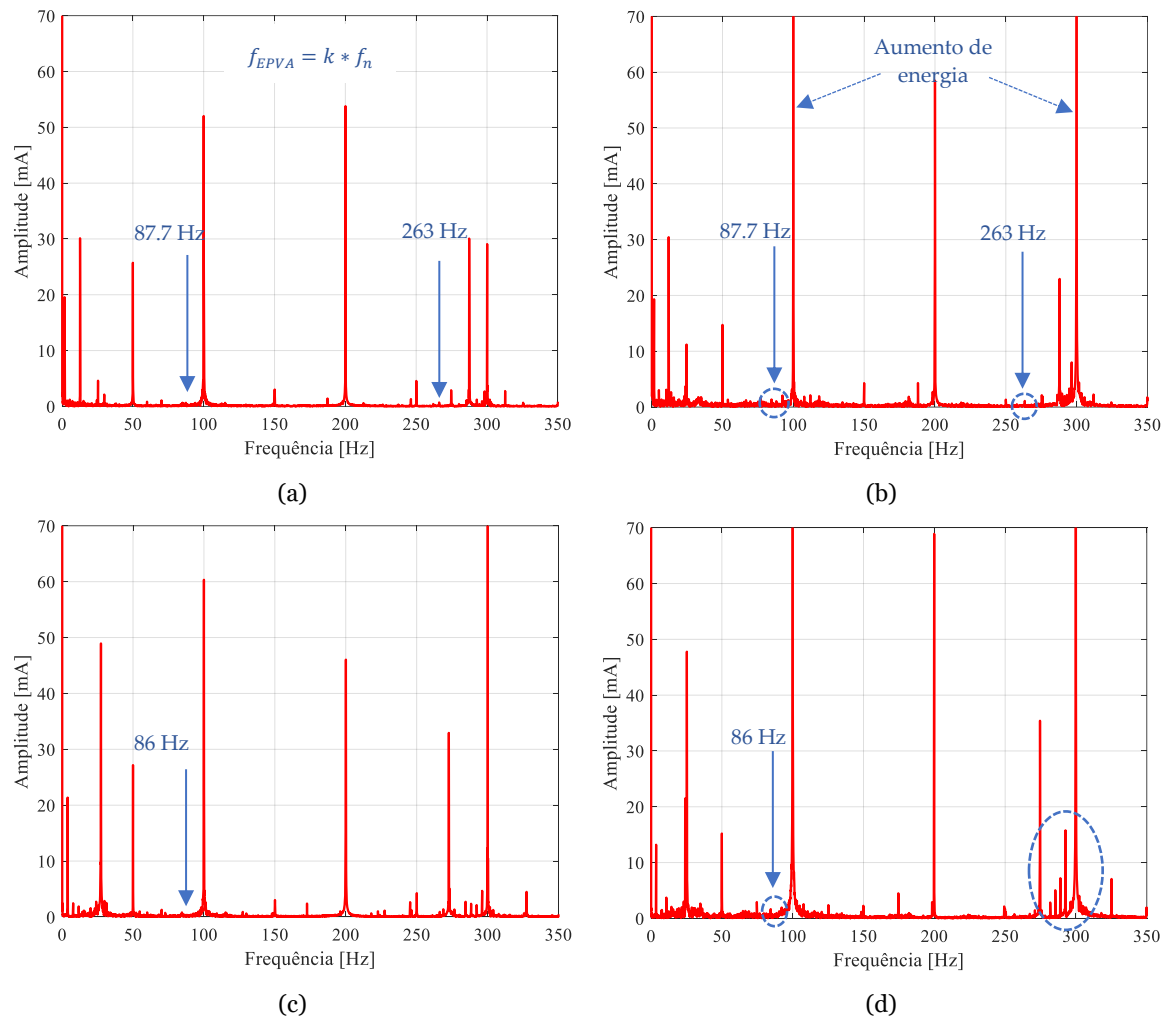


Figura 6.7 – Assinatura do EPVA do para o estado saudável e para o furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento SKF 6206-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.

A segunda avaria, relacionada com o rolamento instalado no lado motriz do motor, é detalhada nos espectrogramas da Figura 6.7. Na Figura 6.7 (b), observa-se o espectrograma obtido a partir do funcionamento em avaria, a meia carga, cujo comportamento é semelhante ao da primeira avaria. É possível detetar aumentos de energia com maior

intensidade nos harmônicos de 100 Hz e 300 Hz, bem como ligeiros picos ou aumentos na amplitude das frequências em relação à avaria da pista externa detalhada na Tabela 6.9.

A análise do funcionamento a plena carga é apresentada na Figura 6.7 (c) e Figura 6.7 (d). Observa-se claramente um ligeiro aumento de energia ao longo do espectro. Novamente, os harmônicos de 100 Hz e 300 Hz são os que aumentam a sua energia de forma significativa, adicionando também o harmónico de 200 Hz. Tal como na análise anterior, as bandas laterais estão presentes em torno de 300 Hz.

A Figura 6.8 mostra os espectrogramas da última avaria, que se refere ao *pitting* tanto nas pistas externa e interna, devido a descargas elétricas no rolamento no lado não motriz. A Figura 6.8 (a) e Figura 6.8 (b) representam o funcionamento a meia carga e a Tabela 6.10 especifica as frequências observadas associadas à avaria da pista externa e da pista interna.

Tabela 6.10 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA do rolamento SKF 6205-2Z, a meia carga e plena carga.

$f_s = 50 \text{ Hz}$		
Meia carga	Pista interna	Pista externa
	$f_n = f_{bir} = 133 \text{ Hz}$	$f_n = f_{bor} = 88.072 \text{ Hz}$
$f_{EPVA} = k * f_n$	K=1	K=2
Frequências [Hz]	133	176
Plena carga	$f_n = f_{bir} = 130.3 \text{ Hz}$	$f_n = f_{bor} = 86.3 \text{ Hz}$
$f_{EPVA} = k * f_n$	K=1	K=1
Frequências [Hz]	130.3	86.3

Na análise ao espectrograma obtido para o funcionamento a meia carga, na Figura 6.8 (b), observa-se um aumento geral de energia no intervalo de 0 Hz a 200 Hz. Neste intervalo, estão incluídas as 2 frequências características da pista externa e da pista interna. Devido ao aumento geral de energia, não é possível identificar claramente os picos ou frequências das avarias, sendo a mais notória a componente associada à frequência da via externa para um valor de $k = 2$, conforme indicado no espectrograma. Relativamente ao funcionamento a plena carga, apresentado na Figura 6.8 (d), verificam-se semelhanças ao funcionamento a meia carga, verificando-se um aumento generalizado de energia, como indicado no espectrograma. Não é possível detetar claramente as frequências relacionadas com a avaria.

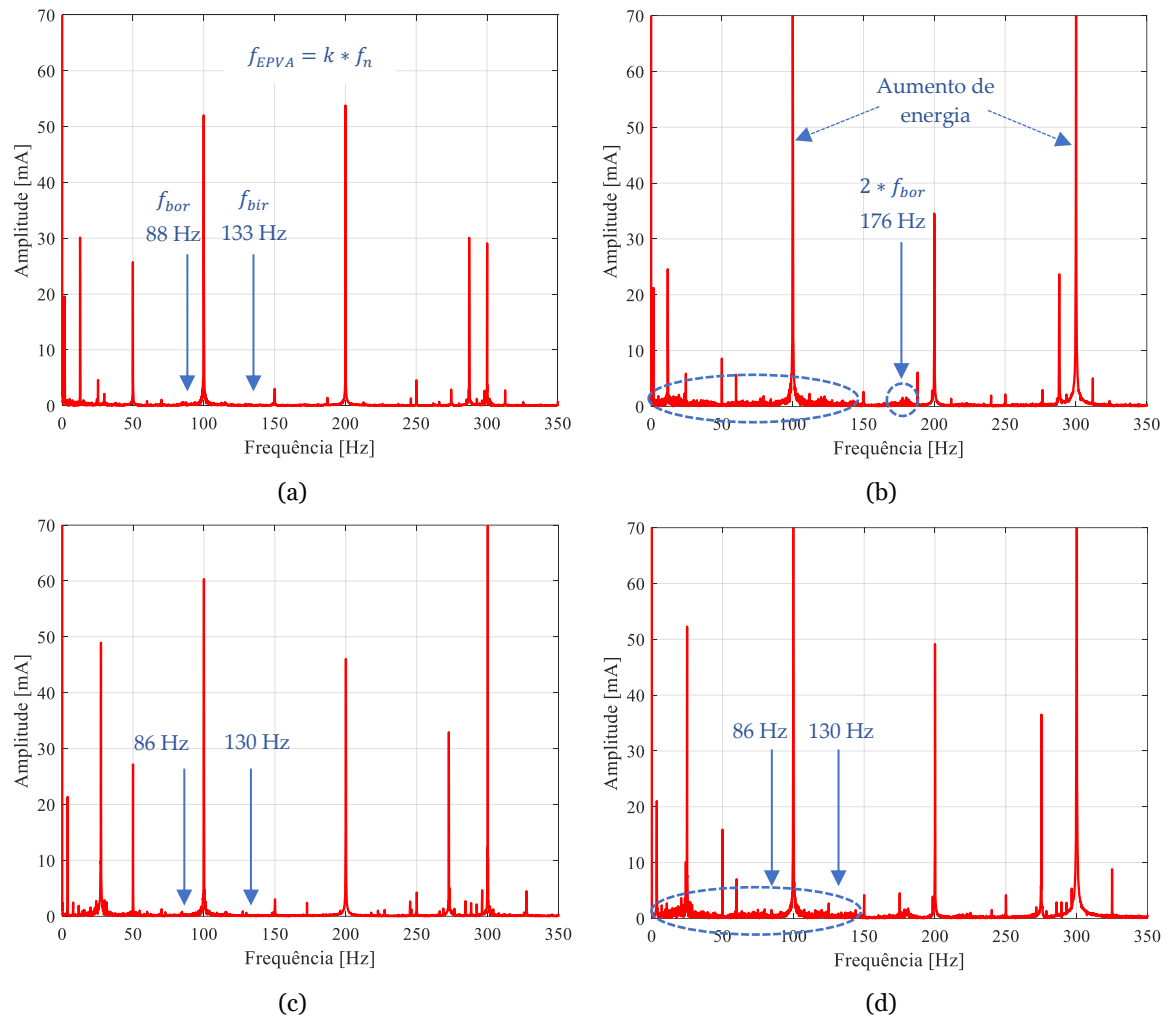


Figura 6.8 – Assinatura do EPVA para a condição saudável e para *pitting* por ED no rolamento SKF 6205-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.

Nos três casos de avaria avaliados através da análise da assinatura EPVA, é transversal o aumento muito acentuado da energia associada às frequências de 100 Hz e 300 Hz. Para além disso, as frequências de 12,7 Hz e 287,4 Hz, que foram mencionadas na primeira análise, mantiveram-se praticamente constantes em todos os casos de avaria. Verificando-se a sua presença tanto no estado saudável como no avariado, afirma-se que estas frequências não estão ligadas às avarias dos rolamentos.

Para concluir esta análise da assinatura EPVA, a Figura 6.9 mostra a análise da magnitude da frequência característica da pista exterior em relação ao nível de carga, para cada caso de estudo, à semelhança do estudo feito com a STFT. Já a Figura 6.10 mostra a evolução da amplitude da frequência característica da pista interior, para a condição de *pitting* gerado por descargas elétricas. Verifica-se, efetivamente, um aumento de energia no estado de avaria, com uma tendência linear.

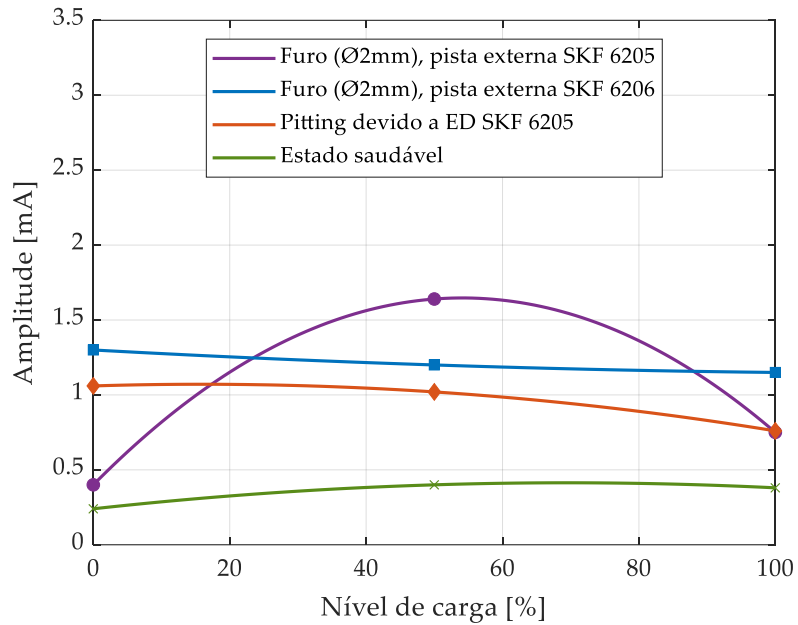


Figura 6.9 – Amplitude da frequência caraterística da pista externa do rolamento (f_{bor}) em função do nível de carga, por aplicação do método EPVA.

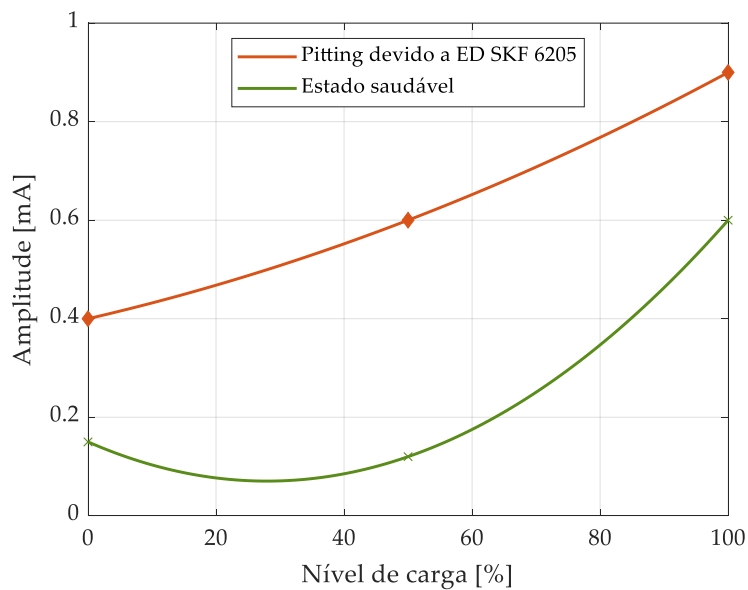


Figura 6.10 – Amplitude da frequência caraterística da pista interna do rolamento (f_{bir}) em função do nível de carga, por aplicação do método EPVA.

6.4 Aplicação do método híbrido

A implementação de um método híbrido consiste em combinar as vantagens oferecidas por cada método, de modo a obter resultados mais fiáveis na análise de avarias. O método EPVA, por si só, contribui para uma informação mais completa, uma vez que analisa a

informação das três correntes elétricas do sistema elétrico, sendo mais sensível na detecção de frequências relacionadas com avarias em estados incipientes, enquanto que o STFT, para além de analisar as frequências, analisa a sua variação ao longo do tempo, especialmente para sinais não estacionários. Na presença de avarias, como é o caso da degradação nos rolamentos, o sinal de corrente elétrica assume um comportamento não estacionário, devido às variações no sinal elétrico que causam essas avarias. O método híbrido segue a mesma lógica que as análises anteriores.

Tabela 6.11 – Frequências correspondentes às componentes espectrais no método híbrido, para o rolamento SKF 6205-2Z, a meia carga e plena carga.

$f_s = 50 \text{ Hz}$		
Meia carga	$f_n = f_{bor} = 88.072 \text{ Hz}; \quad n = 1474 \text{ rpm}$	
$f_{Híbrida} = k * f_n$	K=1	K=3
Frequências [Hz]	88	264
Plena carga	$f_n = f_{bor} = 86.3 \text{ Hz}; \quad n = 1443 \text{ rpm}$	
$f_{Híbrida} = k * f_n$	K=1	K=2
Frequências [Hz]	86.3	172.6

A Figura 6.11 mostra quatro espectrogramas, resultantes da aplicação do método híbrido. A Figura 6.11 (a) e a Figura 6.11 (b) mostram, respetivamente, a condição saudável e a condição de furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento instalado no lado não motor. Sendo este método baseado na análise do módulo das componentes I_d e I_q do vetor de Park, esperam-se aumentos de energia nas frequências indicadas na análise EPVA, de acordo com a expressão $k * f_n$.

A

Tabela 6.11 indica as frequências características a considerar na aplicação do método híbrido, para o rolamento SKF 6205-2Z. Ao analisar o espectrograma relativo à operação a meia carga - Figura 6.11 (b), não é possível apreciar diferenças relevantes entre os espectrogramas em torno das frequências relacionadas com a avaria. A particularidade mais notória é o aumento da largura de banda e da energia em torno de 300 Hz.

Os espectrogramas apresentados na Figura 6.11 (c) e na Figura 6.11 (d) Figura 6.11 representam o estado de funcionamento a plena carga. Estes apresentam um comportamento semelhante ao do funcionamento a meia carga. Os aumentos de energia nas frequências relacionadas com a avaria não são bem definidos ou são mínimos, observando-se apenas ligeiras variações ao longo do tempo. O aumento das bandas laterais em torno dos 300 Hz mantém-se e é a característica com maior presença no espectrograma. Para além disso, verifica-se um aumento geral de energia nos harmónicos que surgem devido à frequência fundamental.

Os espectrogramas relativos à mesma avaria, para o funcionamento em vazio, são apresentados no apêndice A, Figura A.9, Figura A.10, Figura A.11 e Figura A.12.

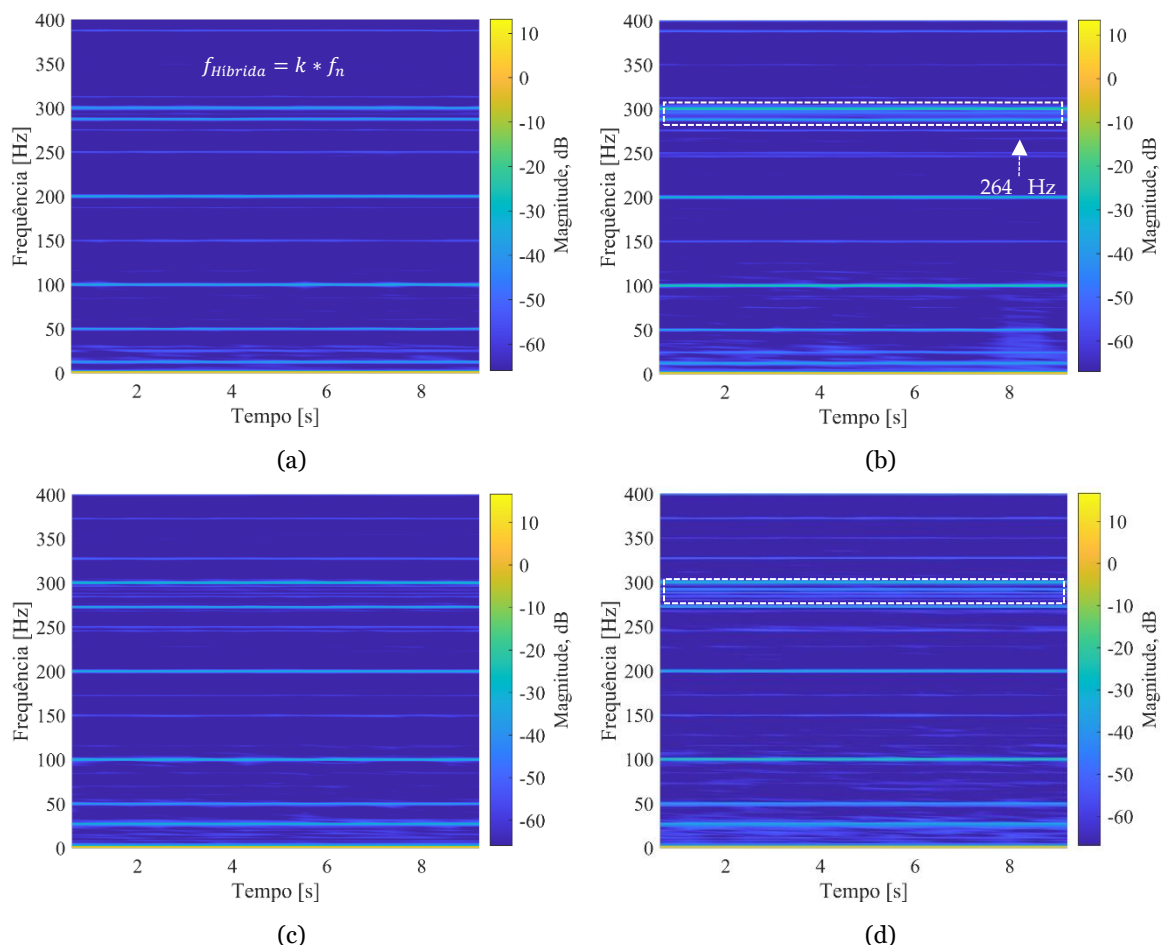


Figura 6.11 – Aplicação do método híbrido às condições de funcionamento saudável e de furo de $\varnothing 2$ mm na pista exterior do rolamento SKF 6205-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.

Tabela 6.12 – Frequências correspondentes às componentes espectrais no método híbrido, para o rolamento SKF 6206-2Z, a meia carga e plena carga.

$f_s = 50 \text{ Hz}$			
Meia carga	$f_n = f_{bor} = 87.7 \text{ Hz}; \quad n = 1474 \text{ rpm}$		
$f_{Hibrida} = k * f_n$	K=1	K=2	K=3
Frequências [Hz]	87.7	175.4	263
Plena carga	$f_n = f_{bor} = 85.9 \text{ Hz}; \quad n = 1443 \text{ rpm}$		
$f_{Hibrida} = k * f_n$	K=1	K=2	
Frequências [Hz]	85.9	172	

Por seu turno, os espectrogramas obtidos para a condição de avaria referente ao furo de $\varnothing 2$ mm na pista exterior do rolamento instalado no lado de ataque é apresentado na Figura 6.12. Na Figura 6.12 (a) e na Figura 6.12 (b), é feita a comparação entre o estado saudável e

o estado de avaria a meia carga. Nestas condições, o método híbrido já apresenta informação relevante, com um aumento de energia transversal a todas as frequências, sobretudo no que diz respeito às frequências relativas à avaria, que estão descritas na Tabela 6.12. Observam-se variações e aumentos de energia particularmente relevantes em torno de 87,7 Hz, 175,4 Hz e 263 Hz. Estas são as frequências características ligadas à pista exterior do rolamento. Por outro lado, a variação e aumento da largura de banda, bem como das bandas laterais em torno dos 300 Hz é muito evidente. Este padrão manteve-se em todas as análises; no entanto, é nesta avaria que tal é mais visível.

No espectrograma da Figura 6.12 (d), referente à análise a plena carga, são também evidentes os sintomas da avaria. Em comparação com o estado saudável, o aumento de energia nas diversas frequências características é muito notório, especialmente o aumento das bandas laterais em torno de 100 Hz. De facto, todas estas bandas acabam por se dissimular ou confundir com a frequência associada à avaria. Ainda assim, observa-se claramente, no instante $t = 8$ s, o aumento de energia na frequência de 85,9 Hz, que é a frequência característica da avaria para este estado de funcionamento.

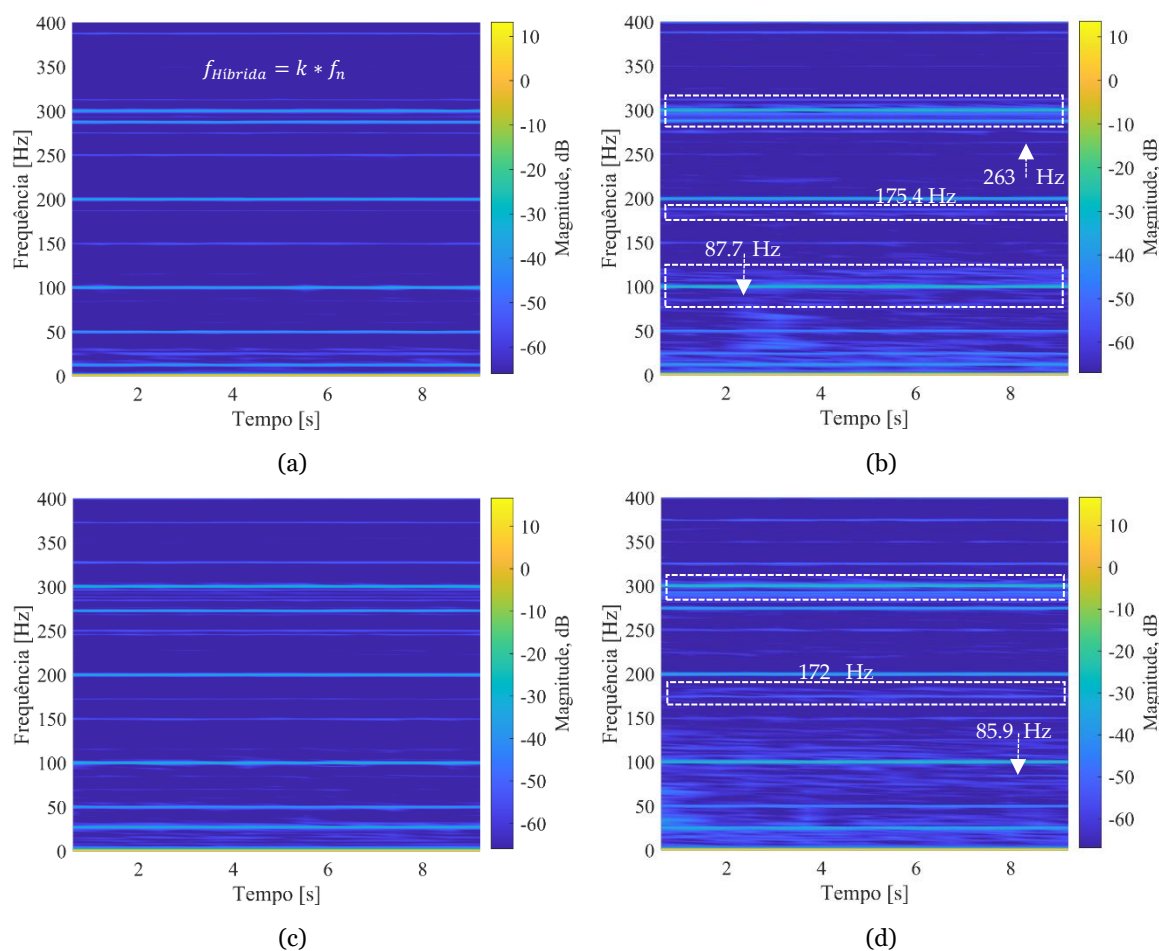


Figura 6.12 – Aplicação do método híbrido às condições de funcionamento saudável e de furo de $\varnothing 2$ mm na pista exterior do rolamento SKF 6206-2Z: (a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.

A Figura 6.13 mostra os espectrogramas comparativos entre o estado saudável e o estado danificado. A comparação dos espectrogramas da Figura 6.13 (a) e da Figura 6.13 (b) mostra claramente uma dispersão e alargamento das bandas de frequência ao longo do espectro, com um aumento particularmente evidente na gama de 0 Hz a 200 Hz. Nesta circunstância, não se regista um aumento das bandas laterais nem um aumento da largura de banda em torno dos 300 Hz, mas há indícios de um aumento de energia devido à variação da intensidade da sua cor. Uma região chave ligada à avaria é o aumento notável da energia e das bandas laterais em torno dos 176 Hz. Observa-se no estado saudável que esta frequência não está presente no espectrograma, enquanto na análise da avaria em torno desta frequência há um aumento muito marcado da sua energia, acompanhado de bandas laterais e de uma largura de banda muito marcada pela distorção presente, o que se deve efetivamente à presença de vibrações e perturbações indesejadas introduzidas pela avaria mecânica no rolamento. A Tabela 6.13 apresenta as principais frequências associadas à última avaria, relativa ao rolamento SKF 6205-2Z, com *pitting* distribuído nas suas pistas exterior e interior.

Tabela 6.13 – Frequências correspondentes às componentes espectrais no método híbrido, para o rolamento SKF 6205-2Z, a meia carga e plena carga.

$f_s = 50 \text{ Hz}$		
Meia carga	Pista interna	Pista externa
	$f_n = f_{bir} = 133 \text{ Hz}$	$f_n = f_{bor} = 88.072 \text{ Hz}$
$f_{Hibrida} = k * f_n$	K=1	K=2
Frequências [Hz]	133	176
Plena carga	$f_n = f_{bir} = 130.3 \text{ Hz}$	$f_n = f_{bor} = 86.3 \text{ Hz}$
$f_{Hibrida} = k * f_n$	K=1	K=2
Frequências [Hz]	130.3	172.6

Em relação ao estado de plena carga, apresentado no espectrograma da Figura 6.13 (d), observa-se um comportamento muito semelhante ao estado de funcionamento a meia carga, verificando-se um aumento de energia em todo o espectrograma, principalmente em toda a gama de 0 Hz a 150 Hz, em torno de 175 Hz e de 300 Hz. Também aqui, em torno de 173 Hz, se nota o aumento de energia devido às frequências da avaria quando K assume o valor 2, como é referido na Tabela 6.13 e no espectrograma. Ocorre também um ligeiro aumento de energia em torno de 300 Hz e das suas bandas laterais.

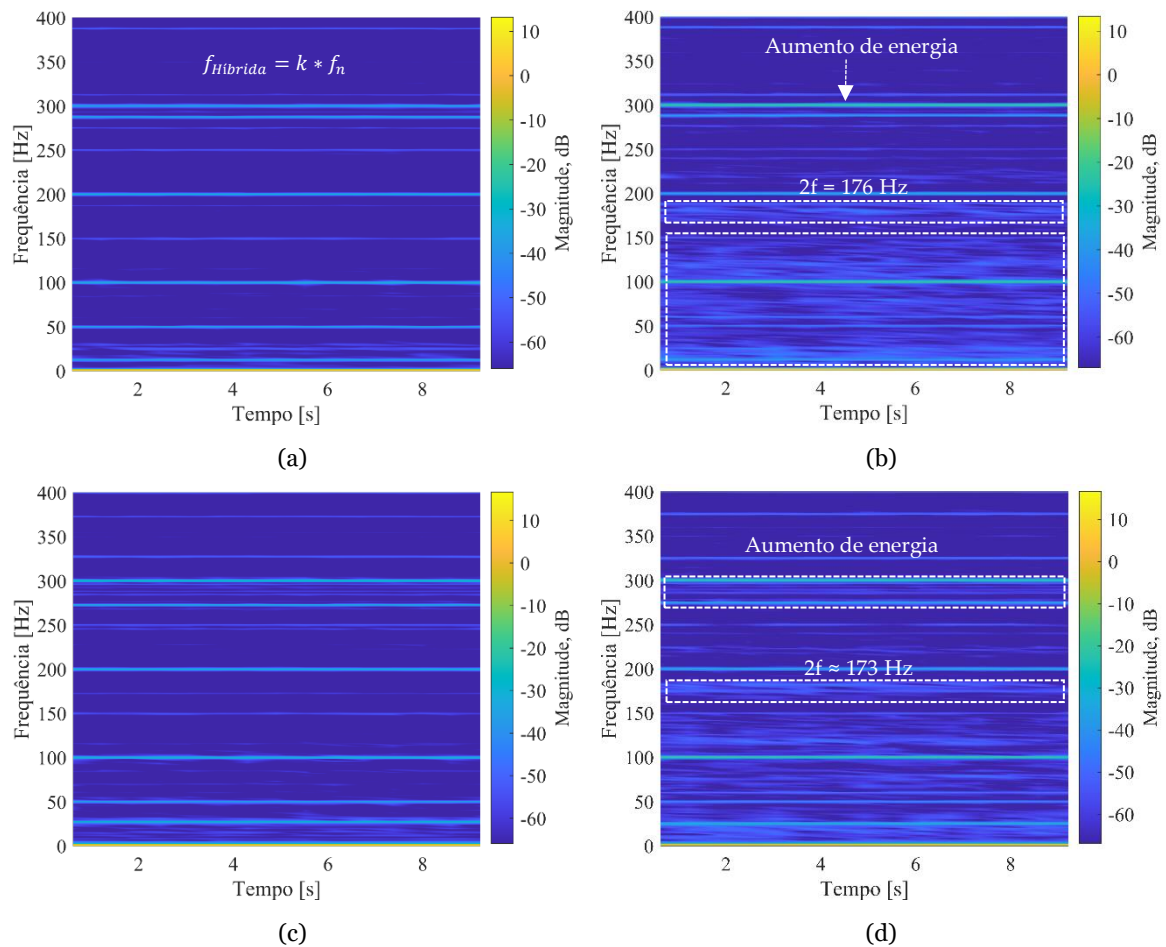


Figura 6.13 – Método híbrido aplicado às correntes de alimentação do MI, considerando estado saudável e *pitting* por ED no rolamento SKF 6205-2Z:(a) saudável a meia carga; (b) avaria a meia carga; (c) saudável a plena carga; (d) avaria a plena carga.

Finalmente, a Figura 6.14 mostra a análise aos aumentos de energia, observados para a frequência característica da pista externa, em cada ensaio realizado. O objetivo é comparar cada estado de avaria com o estado saudável, avaliando se a frequência referente à avaria apresenta ou não aumentos na sua energia. É importante compreender que a magnitude desta frequência não é constante ao longo do tempo, conforme observado em cada espectrograma, pelo que este gráfico apresenta dados relativos ao maior pico de energia que foi detetado em cada ensaio. Da análise aos resultados obtidos, resulta que a avaria referente ao furo de $\varnothing 2$ mm na pista exterior do rolamento SKF 6205-2Z apresentou o maior aumento de energia num determinado momento. Tal mas isso não significa que tenha sido esta a avaria que apresentou resultados mais esclarecedores, uma vez que, de acordo com a análise a cada espectrograma relativo à avaria 2 (linha azul) e à avaria 3 (linha laranja), estas foram as avarias que apresentaram aumentos de energia muito acentuados e que forneceram uma melhor informação sobre as frequências e distorções provocadas pelas avarias introduzidas nos rolamentos, podendo também verificar-se neste gráfico que a tendência dos aumentos de energia é muito semelhante entre estas duas avarias.

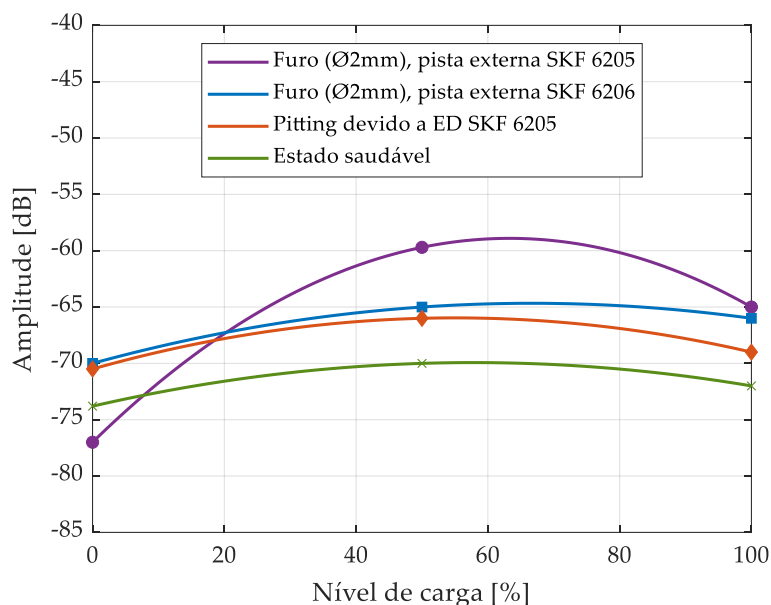


Figura 6.14 – Amplitude da frequência característica da pista externa do rolamento (f_{bor}) em função do nível de carga, por aplicação do método híbrido.

6.5 Discussão dos resultados

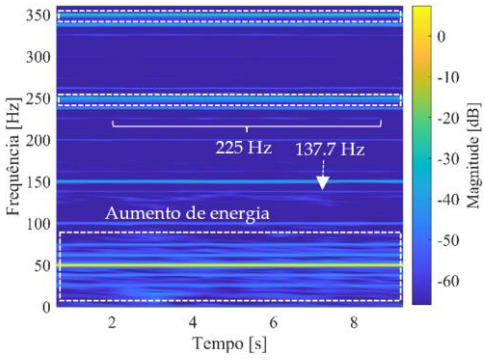
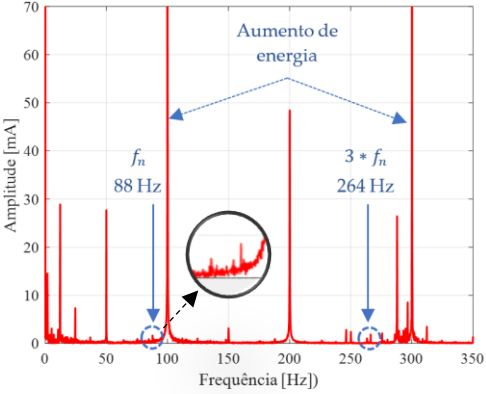
Uma vez efetuada a avaliação espectral das correntes elétricas do estator do MI, através da aplicação da STFT, EPVA e por hibridização destas duas técnicas, a Tabela 6.14 apresenta uma análise global de cada uma destas técnicas, resumindo as vantagens de cada método, indicando as características mais relevantes de cada um destes métodos na análise dos sintomas que geraram as avarias artificiais nos rolamentos analisados, a fim de comparar em que ensaios, em que condições e através de que análise se obtiveram os melhores resultados.

Todos os métodos apresentam características que nos dão indicações de que estes elementos mecânicos, os rolamentos, apresentam algum tipo de avaria. Efetivamente, a combinação da técnica STFT aplicada ao sinal do módulo do vetor de Park melhorou a interpretação dos resultados, uma vez que a técnica STFT nos dá uma melhor interpretação do comportamento das frequências no tempo e do espectro em geral. É também evidente nos espectrogramas a visualização de distorções, bandas laterais e aumentos de largura de banda em harmônicos específicos. Graças à boa informação sobre as frequências do módulo do vetor de Park, também é possível apreciar estas perturbações em torno das frequências características do rolamento.

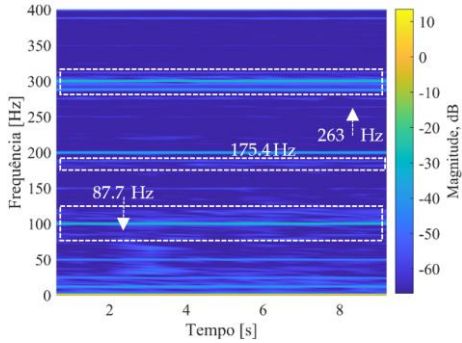
Com a análise EPVA, é mais fácil quantificar os aumentos de energia nas frequências devidas a avaria, bem como os aumentos de energia em certos harmônicos devidos a estas

avarias mecânicas. Por esta razão, a Figura 6.15 mostra o aumento de energia dos harmônicos de 100 Hz e 300 Hz, que foram mais perceptíveis na análise EPVA.

Tabela 6.14 – Contribuições de cada método para o diagnóstico de avarias em rolamentos.

STFT	
Sintomas detetados	Cenário em que o método é mais eficaz
<ul style="list-style-type: none"> Avaria 1 e 2 (Furo de Ø2 mm) <p>- As mesmas características do espectrograma em função do tipo de avaria, independentemente da posição do rolamento.</p> <p>- Mais eficaz em funcionamento a meia carga.</p> <p>- Mais sensível às avarias no rolamento do lado motriz.</p> <p>- Distorções e aumentos de largura de banda em torno de 250 Hz e 350 Hz.</p> <p>- Variação de energia ao longo do tempo em torno das frequências características do rolamento - neste caso, aquelas associadas à pista exterior.</p>	<p>Espectrograma associado à avaria de furo de Ø2 mm na pista exterior do rolamento instalado no lado de ataque, analisado na Figura 6.3 (b).</p> 
<ul style="list-style-type: none"> Avaria 3 (<i>pitting</i> por ED) <p>Aumento geral de energia no espectrograma.</p> <p>Menos sensível à detecção deste tipo de avaria.</p>	
EPVA	
Sintomas detetados	Cenário em que o método é mais eficaz
<p>- Aumento geral da energia no espectrograma de frequências, para todos os tipos de avarias.</p> <p>- Diagnóstico mais fácil dos picos de frequência relacionados com a avaria.</p> <p>- Diagnóstico mais sensível a defeitos precoces, ou seja, defeitos pontuais que eram representados por furos na pista exterior.</p> <p>- Grande aumento de energia nos harmônicos de 100 Hz e 300 Hz.</p>	<p>Espectrograma associado à avaria de orifício de Ø2 mm na pista exterior do rolamento no lado não motor obtidos a partir da Figura 6.6 (b).</p> 

Continuação da Tabela 6.14 – Contribuições de cada método para o diagnóstico de avarias em rolamentos.

HÍBRIDO	
Sintomas detetados	Cenário em que o método é mais eficaz
<p>- A visualização dos aumentos de energia é mantida, mas a resolução das frequências características dos rolamentos é melhorada em comparação com a análise STFT.</p> <p>- Melhor visualização do aumento da energia e do aumento das bandas laterais, em comparação com o EPVA.</p> <p>- Mais eficaz na avaria do rolamento do lado motriz e na avaria relacionada com o <i>pitting</i> por ED no rolamento do lado não motriz.</p>	<p>Espectrograma associado à avaria de furo de $\varnothing 2$ mm na pista exterior do rolamento instalado no lado de ataque, analisado na Figura 6.12 (b).</p> 

Na Figura 6.15 (a) e na Figura 6.15 (b), é evidente o aumento notável de energia em ambos os harmônicos. Note-se que, quando obtidas a partir da análise EPVA, estas frequências correspondem aos harmônicos de 150 Hz e 350 Hz (3° e 7°). Na análise STFT, também se registam aumentos de energia em torno destes harmônicos, embora menos pronunciados. Em vez disso, observam-se no espectrograma bandas laterais e um aumento da largura de banda. De acordo com estes gráficos, a avaria que apresentou o maior aumento de energia foi a terceira, associada a *pitting* devido a descargas elétricas. No caso da frequência de 100 Hz, a energia quadruplica em relação à condição saudável durante o funcionamento a meia carga, e quintuplica durante o funcionamento a plena carga. Quanto à frequência de 300 Hz, a energia quadruplica a meia carga e duplica a plena carga, sempre em relação à condição saudável.

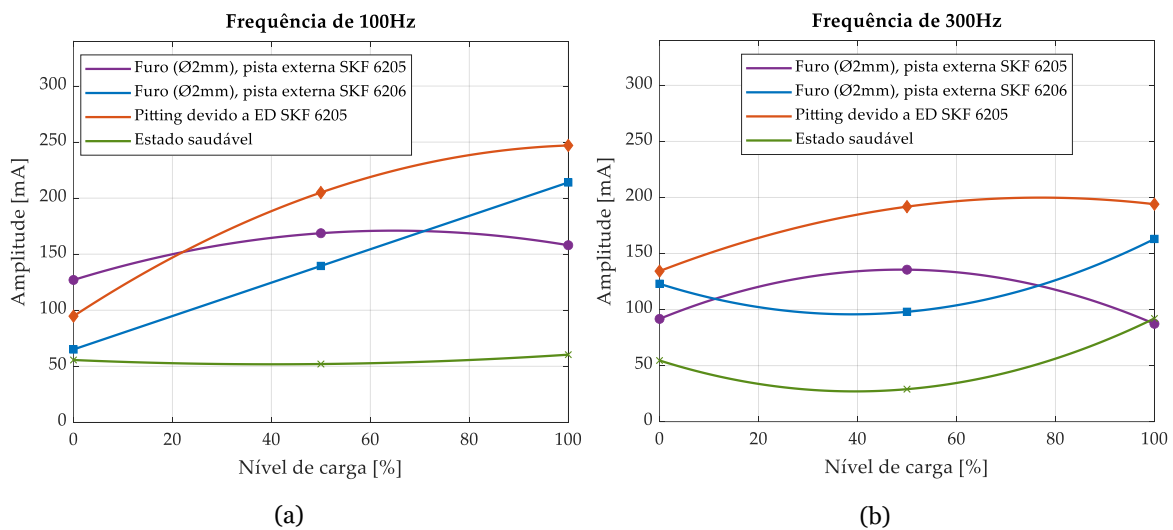


Figura 6.15 – Aumento da amplitude do terceiro e sétimo harmônicos na análise do EPVA.

Na comparação e avaliação dos métodos aplicados neste trabalho, é importante compreender que um dos principais objetivos é conseguir o diagnóstico de avarias nas suas fases iniciais ou incipientes. Por esta razão, as avarias introduzidas artificialmente para esta análise centram-se, em grande parte, nesta gama de severidade. Muitos estudos utilizam furos nas pistas exteriores e interiores dos rolamentos para simular avarias localizadas em cada componente do rolamento, tendo sido efetuados furos nas pistas dos rolamentos cujos diâmetros variam entre \varnothing 1,5 mm e \varnothing 8 mm, para simular o comportamento das avarias em função do tamanho do furo, desde uma condição moderada até uma condição grave.

Neste trabalho, analisou-se a pista externa dos rolamentos com furo de \varnothing 2 mm, avaria classificada dentro da gama moderada. Em [28], foram analisadas avarias com características semelhantes. Através da implementação do EPVA, componentes característicos em torno das frequências de avaria dos elementos de rolamento puderam ser detetados, mesmo em fases iniciais, como foi o caso do furo de \varnothing 2 mm. No entanto, foi referido que as componentes espectrais identificadas tinham uma amplitude muito pequena para este diâmetro.

Este estudo confirma os resultados obtidos na análise deste tipo de avarias através da aplicação do EPVA. Tal como observado em análises anteriores, são evidentes pequenos picos de energia em torno das frequências características esperadas. Este aspeto é fundamental, pois, ao identificar quais as frequências que têm associados aumentos de energia, podemos caracterizar corretamente qual o componente do rolamento afetado por uma avaria.

Em relação à aplicação da técnica STFT em estudos de avarias de rolamentos, como referido em [74], observou-se que a energia diminuiu nas frequências de 25 Hz, 100 Hz e 125 Hz, enquanto as frequências de 150 Hz, 350 Hz e 450 Hz apresentaram um notável aumento de energia relativamente ao estado normal. Por outro lado, o estudo em [102] apresenta uma análise de uma avaria no anel exterior, testada sob três níveis de carga (0%, 50% e 100%). Nesta análise, destacam-se duas constatações fundamentais: em primeiro lugar, o comportamento das amplitudes dos harmónicos da rede (1° , 3° , 5° , ... 19°), onde se observou que as amplitudes nos casos de avaria eram superiores às do sistema saudável; em segundo lugar, foi identificado um aumento de energia na frequência natural do anel exterior, cerca de 275 Hz, sendo este aumento mais notório numa avaria moderada do que numa avaria severa.

Em comparação com o presente estudo, os resultados obtidos por STFT mostraram um aumento de energia principalmente nos harmónicos de 250 Hz e 350 Hz. Para além disso, foi observado um aumento de energia nas bandas laterais em torno dessas frequências. Da análise aos ensaios experimentais realizados neste estudo, constata-se que a técnica STFT

se revela mais eficaz em condições de carga média para o diagnóstico de avarias na pista exterior do rolamento instalado no lado motriz.

Capítulo 7

Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros

7.1 Conclusões

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho de dissertação, constatou-se que a comunidade científica tem desenvolvido um esforço significativo na análise e desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais, com especial foco nos sinais elétricos, que desempenham um papel crucial no diagnóstico de avarias em MIs. Entre a ampla gama de técnicas de processamento de sinais aplicadas ao diagnóstico de avarias, destaca-se a aplicação da STFT devido à sua capacidade de análise no domínio tempo-frequência, assim como o método EPVA, baseado numa análise no domínio da frequência, que incorpora a informação elétrica das três fases de alimentação do motor elétrico. Estas técnicas constituem a base deste trabalho, tendo sido implementadas na análise da corrente elétrica estatórica, que, pela facilidade de obtenção dentro do sistema, é valorizada como um método não invasivo, tornando-se, assim, de grande relevância para o diagnóstico de avarias em máquinas elétricas. Para obter bons resultados na análise, é importante ter uma boa gestão e recolha de dados, o que foi conseguido de forma satisfatória e eficaz através dos testes realizados no CISE – Centro de Investigação em Sistemas Electromecatrónicos, nas instalações do Laboratório de Sistemas Electromecatrónicos (CISE | LSE). Os resultados obtidos através da aplicação do método STFT mostram características claras nos espectrogramas perante a presença de avarias nos rolamentos. Em condições saudáveis, o espectrograma é bem definido, mostrando a frequência da rede e os seus harmónicos de forma estável, para diferentes níveis de carga. Na presença de avarias, observa-se um aumento na dispersão de energia em baixas frequências e um alargamento das bandas. Avarias localizadas causam maior distorção e aumentos das energias associadas às frequências características, enquanto avarias distribuídas geram um aumento geral de energia, sem alterações significativas nas bandas. Através da aplicação do método EPVA, observa-se que os espectrogramas tendem a comportar-se de forma muito semelhante na presença de diferentes tipos de avarias. Nas avarias localizadas, as frequências características da avaria são mais perceptíveis do que nas avarias distribuídas. Aqui é mais fácil detetar as frequências associadas à avaria do que na STFT, e quantificar os aumentos de energia nas frequências associadas aos componentes danificados, mas não é possível observar as distorções e variações que os sinais sofrem ao longo do tempo, como se observou na STFT. O método híbrido, implementado neste trabalho, reúne as vantagens dos métodos EPVA e

STFT, pelo que os resultados obtidos sob este conceito apresentaram as características desejadas. Os espectrogramas apresentam informação sobre as variações e aumentos das larguras de banda, que neste caso foi mais notória em torno do sétimo harmónico (350 Hz). Existe uma maior clareza na visualização dos picos de energia em torno das frequências associadas à avaria, bem como a possibilidade de observar a sua variação em função do tempo. Quer no método STFT, quer no método híbrido, o comportamento varia consoante o tipo de avaria, pelo que as avarias 1 e 2, relativas ao furo de $\varnothing 2$ mm na pista exterior, têm o mesmo comportamento, sendo, no entanto, mais eficaz detetá-las no rolamento do lado motor. Os métodos aplicados são, de facto, sensíveis à presença/ausência de avarias nas suas fases iniciais. Ainda assim, as frequências associadas às avarias introduzidas apresentam apenas ligeiras variações ou aumentos de energia, o que continua a dificultar a definição clara da presença de uma avaria nos rolamentos do motor e, sobretudo, a identificação do componente específico do rolamento que está avariado. Em comparação com outros estudos que utilizam as mesmas técnicas de análise, os resultados obtidos neste trabalho apresentam grandes semelhanças com estes, especialmente no que concerne ao aumento significativo de energia nos harmónicos do sistema. Por outro lado, as frequências características das avarias podem estar tão próximas das bandas harmónicas que os aumentos de energia provocados pelas avarias ficam escondidos. Isto é especialmente evidente quando o desalinhamento ou desequilíbrio da carga está presente, como foi observado durante a operação a meia carga, pelo que esta é uma limitação na implementação destas técnicas baseadas no domínio da frequência.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho, enquadrado numa área de investigação aplicada, explorou uma fase introdutória no diagnóstico não invasivo de um dos componentes mecânicos essenciais nas máquinas elétricas rotativas: os rolamentos. Este estudo abre várias oportunidades e coloca desafios importantes para o desenvolvimento de técnicas de diagnóstico eficazes e viáveis para implementação industrial. Assim, sugere-se a extensão deste estudo a mais modos de falha, de modo a simular as avarias mais comuns em rolamentos, especialmente as causadas por lubrificação inadequada, além de variar o grau de severidade dessas avarias.

Outra abordagem crucial, especialmente em aplicações industriais modernas, é a investigação destas avarias em sistemas acionados por inversores, uma vez que estes dispositivos introduzem componentes harmónicas adicionais no sinal eléctrico, o que aumenta a complexidade do processo de diagnóstico de avarias.

Adicionalmente, a incorporação de novas tecnologias nos processos de diagnóstico revela-se de grande importância. A integração de ferramentas de inteligência artificial, como os algoritmos tradicionais de aprendizagem automática (*Machine Learning*), entre os quais se destacam o *Support Vector Machines* (SVM), *Random Forests* (RF), *K-Nearest Neighbors* (KNN) e o *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS), abre novas possibilidades. Por sua vez, a implementação de aprendizagem profunda (*Deep Learning*), centrada nas redes neuronais artificiais (*Artificial Neural Networks* - ANNs), como *Convolutional Neural Networks* (CNN), *Generative Adversarial Networks* (GAN), *Recurrent Neural Networks* (RNN), *Deep Belief Networks* (DBN) e os *Autoencoders* (AE), permitirá avançar no diagnóstico de avarias através da classificação automática e do diagnóstico inteligente de avarias.

REFERÊNCIAS

- [1] D. P. Kothari e I. J. Nagrath, *Electric Machines*, 4th ed. New Delhi - India: McGraw Hill Education Private Limited, 2010.
- [2] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. New York: McGraw Hill, 2011.
- [3] J. F. Mora, *Máquinas Eléctricas*, 5th ed. Madrid - Espanha: Mc-GRAW-HILL, 2008.
- [4] T. Wildi, *Electrical machines, drives, and power systems*, 6th ed. New Jersey: Pearson Education, 2006.
- [5] A. J. M. Cardoso, *Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos*. Coimbra - Portugal: Coimbra Editora, 1991.
- [6] A. J. M. Cardoso, *Diagnosis and Fault Tolerance of Electrical Machines, Power Electronics and Drives*. UK: IET - The Institution of Engineering and Technology, 2018. doi: 10.1049/PBPO126E.
- [7] P. J. Tavner, «Review of condition monitoring of rotating electrical machines», *IET Electr. Power Appl.*, vol. 2, n.º 4, pp. 215–247, 2008, doi: 10.1049/iet-epa:20070280.
- [8] P. F. Albrecht, J. C. Appiarius, R. M. McCoy, E. L. Owen, e D. K. Sharma, «Assessment of the Reliability of Motors in Utility Applications - Updated», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. EC-1, n.º 1, pp. 39–46, mar. 1986, doi: 10.1109/TEC.1986.4765668.
- [9] S. Kumar *et al.*, «A Comprehensive Review of Condition Based Prognostic Maintenance (CBPM) for Induction Motor», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 90690–90704, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2926527.
- [10] M. Ojaghi, M. Sabouri, e J. Faiz, «Analytic Model for Induction Motors Under Localized Bearing Faults», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, n.º 2, pp. 617–626, jun. 2018, doi: 10.1109/TEC.2017.2758382.
- [11] A. Das e S. Ray, «A Review on Diagnostic Techniques of Bearing Fault and its modeling in Induction Motor», em *2020 IEEE Calcutta Conference (CALCON)*, Kolkata, India: IEEE, fev. 2020, pp. 502–505. doi: 10.1109/CALCON49167.2020.9106511.
- [12] K. Yatsugi, S. E. Pandarakone, Y. Mizuno, e H. Nakamura, «Common Diagnosis Approach to Three-Class Induction Motor Faults Using Stator Current Feature and Support Vector Machine», *IEEE Access*, vol. 11, pp. 24945–24952, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3254914.
- [13] S. K. Sahdev, *Electrical Machines*. India: Cambridge University Press, 2018.
- [14] WEG, «Guia de especificação motores elétricos». junho de 2023. [Em linha]. Disponível em: www.weg.net

- [15] B. L. Theraja, A. K. Theraja, e S. G. Tarnekar, «Induction Motor», em *A Textbook of Electrical Technology*, vol. II, India: S. Chand Publishing, 2005, pp. 1243–1311.
- [16] M. F. Alves, «ABC das Máquinas Eléctricas». Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, p. 59, 2003.
- [17] C. Nela, «Conversão de Energia II T6CV2/N6CV2 - ppt carregar». Acedido: 19 de fevereiro de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/14520638/>
- [18] Copeld, «Motores con Rotor Bobinado o Anillos Rozantes (+Buena informacion) | Refrigeracion Desde Casa», Motores con Rotor Bobinado o Anillos Rozantes (+Buena informacion) | Refrigeracion Desde Casa. Acedido: 8 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://refrigeraciondesdecasa.blogspot.com/2018/01/motores-con-rotor-bobinado-o-anillos.html>
- [19] Z. Yang, U. C. Merrild, M. T. Runge, G. Pedersen, e H. Børsting, «A Study of Rolling-Element Bearing Fault Diagnosis Using Motor’s Vibration and Current Signatures», *IFAC Proc. Vol.*, vol. 42, n.º 8, pp. 354–359, 2009, doi: 10.3182/20090630-4-ES-2003.00059.
- [20] T. A. Harris e M. N. Kotzalas, *Rolling Bearing Analysis: Advanced concepts of bearing technology*, 5th ed. London - New York: CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [21] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, e J. E. Shigley, *Shigley’s mechanical engineering design*, Tenth edition. em McGraw-Hill series in mechanical engineering. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- [22] A. Ibrahim, F. Bonnardot, M. El Badaoui, e F. Guillet, «Detection of Bearing Damage Using Stator Current, and Voltage to Cancel Electrical Noise», *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2011, n.º 1, pp. 1–14, dez. 2011, doi: 10.1155/2011/235236.
- [23] SKF Group, «Rolling bearings in electric motors and generators». Scanprint as., 2004.
- [24] F. S. S.- www.sollune.com.br, «Rolamento blindado, Rolamento ZZ, Rolamento Vedado o que é?» Acedido: 8 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/rolamento-blindado-e-vedado/>
- [25] SKF, «Princípios de seleção de rolamentos | SKF | SKF». Acedido: 9 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.skf.com/pt/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection>
- [26] B. Li, M.-Y. Chow, Y. Tipsuwan, e J. C. Hung, «Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, n.º 5, pp. 1060–1069, out. 2000, doi: 10.1109/41.873214.

- [27] R. B. Randall e J. Antoni, «Rolling element bearing diagnostics—A tutorial», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, n.º 2, pp. 485–520, fev. 2011, doi: 10.1016/j.ymsp.2010.07.017.
- [28] J. L. H. Silva e A. J. M. Cardoso, «Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park’s vector approach», em *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005.*, Raleigh, NC, USA: IEEE, 2005, p. 6 pp. doi: 10.1109/IECON.2005.1569315.
- [29] H. A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, e H. Meshgin-Kelk, *Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis*. CRC Press, 2012.
- [30] M. B. Koura, A. H. Boudinar, A. F. Aimer, e M.-A. Khodja, «Induction Motor Bearing Faults Diagnosis Using Stator Current and Vibration Analysis», *Period. Polytech. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 65, n.º 4, pp. 344–351, out. 2021, doi: 10.3311/PPee.17284.
- [31] ISO 15243:2017, «Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes». março de 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/80beedo-a-2220-48e9-b6ad-a64ac28c7266/iso-15243-2017>
- [32] SKF Group, «Bearing damage and failure analysis». junho de 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://www.skf.com>
- [33] J. G. Brigoni Massoti, «Metodologia para análise de defeitos em rolamentos e cálculo da vida remanescente à fadiga», Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- [34] F. Xu *et al.*, «A review of bearing failure Modes, mechanisms and causes», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 152, p. 107518, out. 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107518.
- [35] B. Szewczyková, P. Blaškovič, E. Hodúlová, e E. Lechovi, *Study and characteristic of abrasive wear mechanisms.*, Institute of Production Technologies, Faculty of Materials Science and Technology, Slovak University of Technology., 2009.
- [36] Z. Liu e L. Zhang, «A review of failure modes, condition monitoring and fault diagnosis methods for large-scale wind turbine bearings», *Measurement*, vol. 149, p. 107002, jan. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107002.
- [37] H. Hirani, *Fundamentals of Engineering Tribology with Applications*. India: Cambridge University Press, 2016.
- [38] C. M. Pooley e D. Tabor, «Friction and molecular structure: the behaviour of some thermoplastics», *Proc. R. Soc. Lond. Math. Phys. Sci.*, ago. 1972, doi: 10.1098/rspa.1972.0112.
- [39] R. Widner e W. Littmann, «Bearing damage analysis», em *Mechanical Failure: Proceeding of the 20th Meeting*, Washington, D.C., 1976, pp. 67–83.

- [40] S. N. Patel, P. Palit, A. Mishra, J. Mathur, e S. Bhattacharyya, «A comprehensive analysis of failure of cross bearing of universal spindle in Hot Strip Mill», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 98, pp. 1–9, abr. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.010.
- [41] W. Harrer, M. Deluca, e R. Morrell, «Failure analysis of a ceramic ball race bearing made of Y-TZP zirconia», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 36, pp. 262–268, jan. 2014, doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.10.011.
- [42] R. K. Upadhyay, L. A. Kumaraswamidhas, e Md. S. Azam, «Rolling element bearing failure analysis: A case study», *Case Stud. Eng. Fail. Anal.*, vol. 1, n.º 1, pp. 15–17, jan. 2013, doi: 10.1016/j.csefa.2012.11.003.
- [43] W. Ost e P. De Baets, «Failure analysis of the deep groove ball bearings of an electric motor», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 12, n.º 5, pp. 772–783, out. 2005, doi: 10.1016/j.engfailanal.2004.12.003.
- [44] F. Massi, J. Rocchi, A. Culla, e Y. Berthier, «Coupling system dynamics and contact behaviour: Modelling bearings subjected to environmental induced vibrations and ‘false brinelling’ degradation», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 24, n.º 4, pp. 1068–1080, mai. 2010, doi: 10.1016/j.ymsp.2009.09.004.
- [45] M. Phaner-Goutorbe, C. Barthou, L. Porte, e B. Vannes, «Scanning tunneling microscopy study of wear induced by false brinelling on rolling bearings», *Appl. Surf. Sci.*, vol. 108, n.º 1, pp. 45–51, jan. 1997, doi: 10.1016/S0169-4332(96)00571-5.
- [46] JAD, *Example Type B Report Wind: Turbine Blade Pitch Bearing Analysis*, 2015. [Em linha]. Disponível em: www.jadanalysis.co.uk
- [47] F. He, G. Xie, e J. Luo, «Electrical bearing failures in electric vehicles», *Friction*, vol. 8, n.º 1, pp. 4–28, fev. 2020, doi: 10.1007/s40544-019-0356-5.
- [48] Y. P. Raizer e J. E. Allen, *Gas Discharge Physics*, vol. 2. Berlin: Springer, 1997.
- [49] S. Raadnui e S. Kleesuwana, «Electrical pitting of grease-lubricated rolling and sliding bearings: a comparative study», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 364, n.º 1, p. 012041, mai. 2012, doi: 10.1088/1742-6596/364/1/012041.
- [50] J. Abhishek, «Electrical Characterisations of Bearings», Tese de doutoramento, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2019.
- [51] R. J. Arsenault, «Treatise on materials science and technology. Volume VI. Plastic deformation of materials», jan. 1975, [Em linha]. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/7262490>
- [52] N. Ejaz, I. Salam, e A. Tauqir, «Failure analysis of an aero engine ball bearing», *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 6, n.º 6, pp. 25–31, 2006, doi: 10.1361/154770206X156240.
- [53] M. Roy, «Failure Analysis of Bearings of Aero-Engine», *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 19, n.º 6, pp. 1615–1629, dez. 2019, doi: 10.1007/s11668-019-00746-3.

- [54] K. Gurumoorthy, J. P. Dayma, V. Rawat, e M. V. Khair, «Failure Investigation of Differential Pinion Tapered Roller Bearing», *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 15, n.º 5, pp. 593–599, out. 2015, doi: 10.1007/s11668-015-0006-9.
- [55] C. Radu, «The most common causes of bearing failure and the importance of bearing lubrication», RKB Technical review, Fevereiro 2010, pp. 1–7.
- [56] NTN Corporation, «Rolamentos: Cuidados e Manutenção». 2019. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ntn-snr.com/es>
- [57] P. A. Carneiro, G. A. Umbuzeiro, D. P. Oliveira, e M. V. B. Zanoni, «Assessment of water contamination caused by a mutagenic textile effluent/dyehouse effluent bearing disperse dyes», *J. Hazard. Mater.*, vol. 174, n.º 1, pp. 694–699, fev. 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.106.
- [58] M.-H. Evans, «An updated review: White etching cracks (WECs) and axial cracks in wind turbine gearbox bearings», *Mater. Sci. Technol.*, vol. 32, n.º 11, pp. 1133–1169, jul. 2016, doi: 10.1080/02670836.2015.1133022.
- [59] P. J. Blau, L. R. Walker, R. Xu, J. Q. Parten, e T. Geer, «Wear Analysis of Wind Turbine Gearbox Bearings». Oak Ridge National Laboratory, 31 de março de 2010. [Em linha]. Disponível em: <http://www.osti.gov/bridge>
- [60] S. Darmo *et al.*, «Failure analysis of double-row tapered roller bearing outer ring used in Coal Wagon Wheelset», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 135, p. 106153, mai. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106153.
- [61] Z.-Q. Yu e Z.-G. Yang, «Failure Analysis of Fatigue Fracture on the Outer Ring of a Cylindrical Roller Bearing in an Air Blower Motor», *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 12, n.º 4, pp. 427–437, ago. 2012, doi: 10.1007/s11668-012-9583-z.
- [62] W. H. Detweiler, «Common Causes and Cures for Roller Bearing Overheating». SKF USA Inc, 2011.
- [63] Z. Gao, C. Cecati, e S. X. Ding, «A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part I: Fault Diagnosis With Model-Based and Signal-Based Approaches», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, n.º 6, pp. 3757–3767, jun. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2417501.
- [64] R. Nishat Toma, C.-H. Kim, e J.-M. Kim, «Bearing Fault Classification Using Ensemble Empirical Mode Decomposition and Convolutional Neural Network», *Electronics*, vol. 10, n.º 11, Art. n.º 11, jan. 2021, doi: 10.3390/electronics10111248.
- [65] M. R. Barusu e M. Deivasigamani, «Non-Invasive Vibration Measurement for Diagnosis of Bearing Faults in 3-Phase Squirrel Cage Induction Motor Using Microwave Sensor», *IEEE Sens. J.*, vol. 21, n.º 2, pp. 1026–1039, jan. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3004515.

- [66] P. Singru, V. Krishnakumar, D. Natarajan, e A. Raizada, «Bearing failure prediction using Wigner-Ville distribution, modified Poincare mapping and fast Fourier transform», *J. Vibroengineering*, vol. 20, n.º 1, Art. n.º 1, fev. 2018, doi: 10.21595/jve.2017.17768.
- [67] 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.
- [68] M. Sun, H. Wang, P. Liu, Z. Long, J. Yang, e S. Huang, «A Novel Data-Driven Mechanical Fault Diagnosis Method for Induction Motors Using Stator Current Signals», *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 9, n.º 1, pp. 347–358, mar. 2023, doi: 10.1109/TTE.2022.3163612.
- [69] L. Guo, Y. Lei, S. Xing, T. Yan, e N. Li, «Deep Convolutional Transfer Learning Network: A New Method for Intelligent Fault Diagnosis of Machines With Unlabeled Data», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, n.º 9, pp. 7316–7325, set. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2877090.
- [70] X. Chen, W. Xu, Y. Liu, e Md. R. Islam, «Bearing Corrosion Failure Diagnosis of Doubly Fed Induction Generator in Wind Turbines Based on Stator Current Analysis», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, n.º 5, pp. 3419–3430, mai. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2917418.
- [71] A. Da Silva Barcelos, F. M. Mazzoni, e A. J. M. Cardoso, «Bearing Damage Analysis with Artificial Intelligence Algorithms: A New Feature Extraction Approach for Current-Based Signals», *J. Control Autom. Electr. Syst.*, vol. 33, n.º 1, pp. 282–292, fev. 2022, doi: 10.1007/s40313-021-00780-3.
- [72] F. Cipollini, L. Oneto, A. Coraddu, S. Savio, e D. Anguita, «Unintrusive Monitoring of Induction Motors Bearings via Deep Learning on Stator Currents», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 144, pp. 42–51, jan. 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.10.503.
- [73] M. Irfan, N. Saad, R. Ibrahim, V. S. Asirvadam, M. Magzoub, e N. T. Hung, «A Non-Invasive Method for Condition Monitoring of Induction Motors Operating Under Arbitrary Loading Conditions», *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 41, n.º 9, pp. 3463–3471, set. 2016, doi: 10.1007/s13369-015-1996-z.
- [74] M. Lopez-Ramirez *et al.*, «Detection and diagnosis of lubrication and faults in bearing on induction motors through STFT», em *2016 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*, Cholula: IEEE, fev. 2016, pp. 13–18. doi: 10.1109/CONIELECOMP.2016.7438545.
- [75] M.-E.-A. Khodja, A. F. Aimer, A. H. Boudinar, N. Benouzza, e A. Bendiabdellah, «Bearing Fault Diagnosis of a PWM Inverter Fed-Induction Motor Using an Improved

- Short Time Fourier Transform», *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 14, n.º 3, pp. 1201–1210, mai. 2019, doi: 10.1007/s42835-019-00096-y.
- [76] R. Jaros *et al.*, «Advanced Signal Processing Methods for Condition Monitoring», *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 30, n.º 3, pp. 1553–1577, abr. 2023, doi: 10.1007/s11831-022-09834-4.
- [77] D. Z. Li, W. Wang, e F. Ismail, «An Enhanced Bispectrum Technique With Auxiliary Frequency Injection for Induction Motor Health Condition Monitoring», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, n.º 10, pp. 2679–2687, out. 2015, doi: 10.1109/TIM.2015.2419031.
- [78] Z. Feng, M. Liang, e F. Chu, «Recent advances in time–frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: A review with application examples», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 38, n.º 1, pp. 165–205, jul. 2013, doi: 10.1016/j.ymssp.2013.01.017.
- [79] L. Wen, L. Gao, X. Li, L. Wang, e J. Zhu, «A Jointed Signal Analysis and Convolutional Neural Network Method for Fault Diagnosis», *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 1084–1087, jan. 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.117.
- [80] D. Mustafa, Z. Yicheng, G. Minjie, H. Jonas, e F. Jürgen, «Motor Current Based Misalignment Diagnosis on Linear Axes with Short- Time Fourier Transform (STFT)», *Procedia CIRP*, vol. 106, pp. 239–243, jan. 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.185.
- [81] L. Cohen, *Time-Frequency Analysis*. New Jersey - United States of America: Prentice Hall PTR, 1995.
- [82] K. Satpathi, Y. M. Yeap, A. Ukil, e N. Gedda, «Short-Time Fourier Transform Based Transient Analysis of VSC Interfaced Point-to-Point DC System», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, n.º 5, pp. 4080–4091, mai. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2758745.
- [83] W. Dehina, M. Boumehraz, e F. Kratz, «Detectability of rotor failure for induction motors through stator current based on advanced signal processing approaches», *Int. J. Dyn. Control*, vol. 9, n.º 4, pp. 1381–1395, dez. 2021, doi: 10.1007/s40435-021-00765-9.
- [84] P. Pietrzak e M. Wolkiewicz, «Stator Phase Current STFT analysis for the PMSM Stator Winding Fault Diagnosis», em *2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Sorrento, Italy: IEEE, jun. 2022, pp. 808–813. doi: 10.1109/SPEEDAM53979.2022.9841990.
- [85] P. Flandrin, *Time-Frequency/Time-Scale Analysis*. Academic Press, 1998.
- [86] E. G. Strangas, S. Aviyente, e S. S. H. Zaidi, «Time–Frequency Analysis for Efficient Fault Diagnosis and Failure Prognosis for Interior Permanent-Magnet AC Motors»,

- IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, n.º 12, pp. 4191–4199, dez. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.2007529.
- [87] Á. Sapena Bañó, «Desarrollo de técnicas avanzadas de diagnóstico de máquinas eléctricas válidas para cualquier régimen de funcionamiento», Tese de doutoramento, Universidade Politécnica de Valência, Valência-Espanha, 2014.
- [88] M. E. H. Benbouzid e G. B. Kliman, «What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, n.º 2, pp. 238–244, jun. 2003, doi: 10.1109/TEC.2003.811741.
- [89] J. L. H. Silva, «Diagnóstico e análise de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos», Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra – Portugal, 2005.
- [90] A. H. Boudinar, N. Benouzza, A. Bendiabdellah, e M.-E.-A. Khodja, «Induction Motor Bearing Fault Analysis Using a Root-MUSIC Method», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, n.º 5, pp. 3851–3860, set. 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2581143.
- [91] M. A. Awadallah e M. M. Morcos, «Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives-an overview», *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, n.º 2, pp. 245–251, jun. 2003, doi: 10.1109/TEC.2003.811739.
- [92] S. M. A. Cruz e A. J. M. Cardoso, «Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park’s vector approach», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, n.º 5, pp. 1227–1233, out. 2001, doi: 10.1109/28.952496.
- [93] S. M. A. Cruz e A. J. M. Cardoso, «Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park’s Vector Approach», *Electr. Mach. Power Syst.*, vol. 28, n.º 4, pp. 289–299, abr. 2000, doi: 10.1080/073135600268261.
- [94] Z. Gao, C. Cecati, e S. X. Ding, «A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part II: Fault Diagnosis With Knowledge-Based and Hybrid/Active Approaches», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, n.º 6, pp. 3768–3774, jun. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2419013.
- [95] I. Y. Önel, K. B. Dalci, e İ. Senol, «Detection of bearing defects in three-phase induction motors using Park’s transform and radial basis function neural networks», *Sadhana*, vol. 31, n.º 3, pp. 235–244, jun. 2006, doi: 10.1007/BF02703379.
- [96] «DSP7000 High Speed Programmable Controller | Magtrol». Acedido: 22 de julho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.magtrol.com/product/dsp7000-high-speed-programmable-controller/>
- [97] «USB-6366». Acedido: 2 de abril de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.apexwaves.com/modular-systems/national-instruments/x-series/USB->

6366?gad_source=1&gclid=CjoKCQjw2a6wBhCVARIsABPeH1u39V4nLQ5oNrWgA
ppb3sZXhpmCAHuvbVm1IgwXQmz1aGYVlFnlL2oaAnvREALw_wcB

- [98] «What is NI LabVIEW? Graphical Programming for Test & Measurement». Acedido: 22 de julho de 2024. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ni.com/en/shop/labview.html>
- [99] SKF Group, «Rolamentos e vedantes em motores e geradores eléctricos». SKF Group, 2016.
- [100] R. D. S. Araujo, H. De Paula, R. D. A. Rodrigues, L. M. R. Baccarini, e A. V. Rocha, «Premature Wear and Recurring Bearing Failures in an Inverter-Driven Induction Motor—Part I: Investigation of the Problem», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, n.º 6, pp. 4861–4867, nov. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2456059.
- [101] G. Singh, T. Ch. A. Kumar, e V. N. A. Naikan, «A non intrusive methodology for bearing current detection in PWM inverter fed induction motor drive», em *2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, Thrissur: IEEE, jan. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/PICC.2018.8384807.
- [102] R. Z. Haddad, C. A. Lopez, J. Pons-Llinares, J. Antonino-Daviu, e E. G. Strangas, «Outer race bearing fault detection in induction machines using stator current signals», em *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Cambridge, United Kingdom: IEEE, jul. 2015, pp. 801–808. doi: 10.1109/INDIN.2015.7281839.

APÊNDICE A

A seguir, são apresentadas uma série de figuras dos espectrogramas e espectros obtidos através de cada método de diagnóstico implementado (STFT, EPVA, HÍBRIDO), tanto para a condição saudável quanto para as diferentes avarias analisadas durante o funcionamento em vazio.

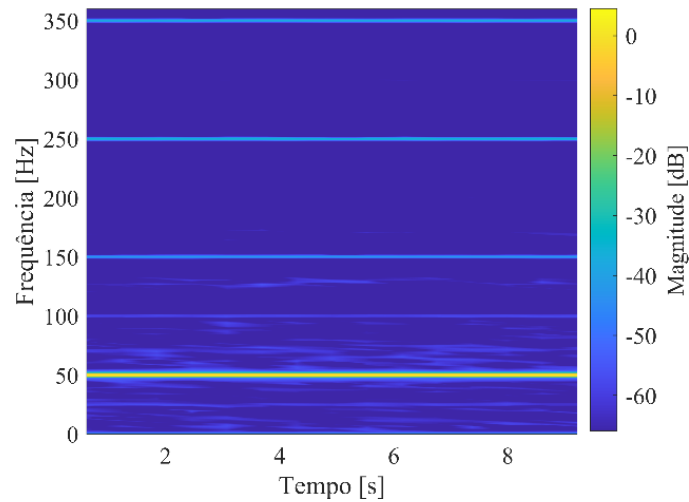


Figura A.1 - Método STFT aplicado às correntes de alimentação do MI para o estado saudável sem carga.

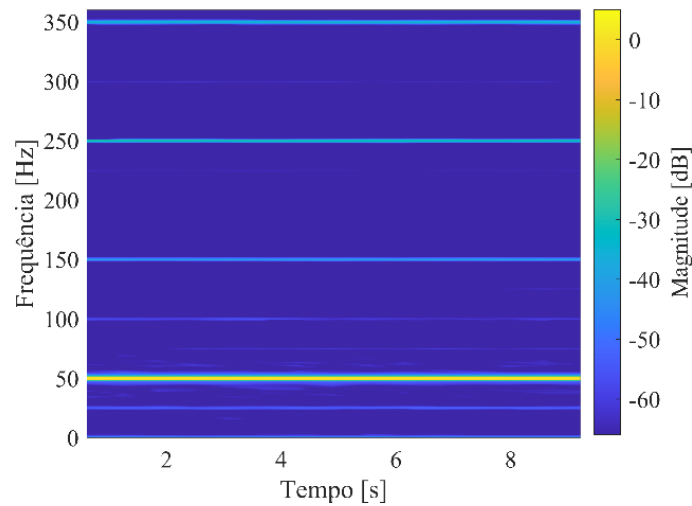


Figura A.2 - Método STFT aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de Ø2mm na pista externa do rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.

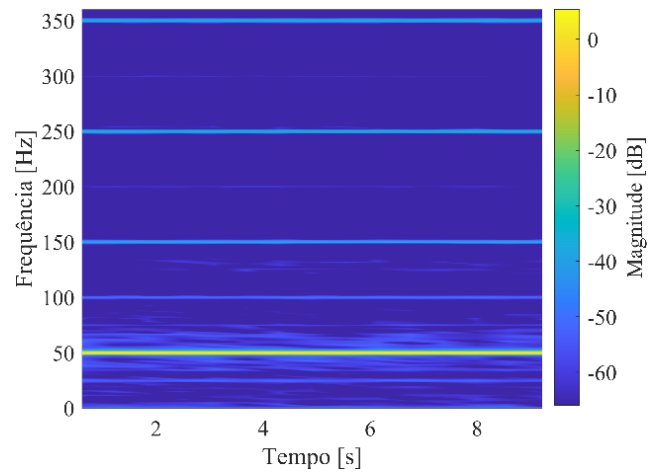


Figura A.3 - Método STFT aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de $\varnothing 2\text{mm}$ na pista externa do rolamento SKF 6206-2Z, sem carga.

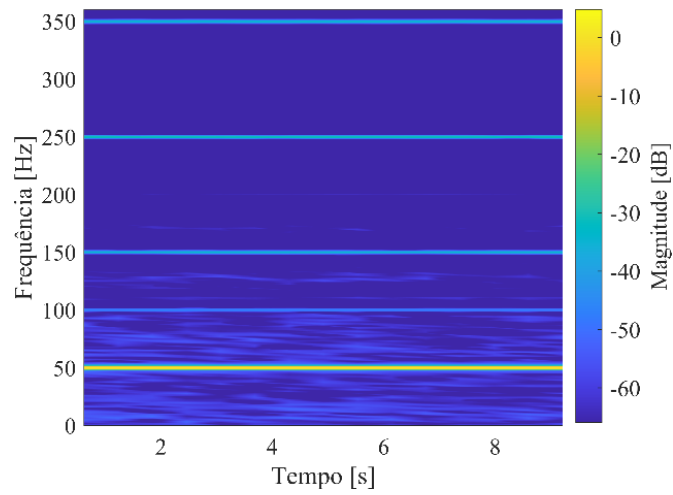


Figura A.4 - Método STFT aplicado às correntes de alimentação do MI para o *pitting* por ED no rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.

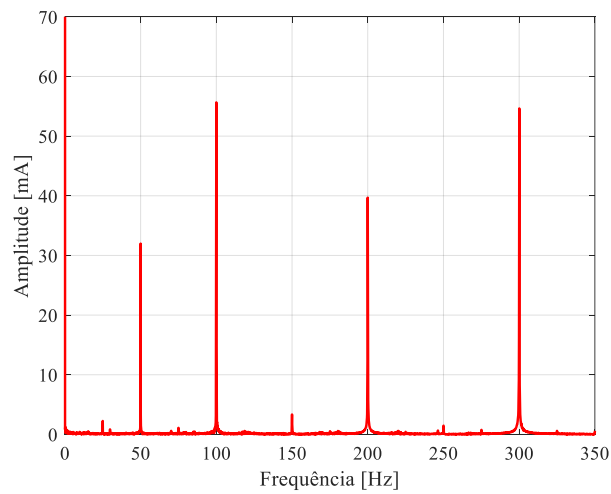


Figura A.5 - Método EPVA aplicado às correntes de alimentação do MI para o estado saudável sem carga.

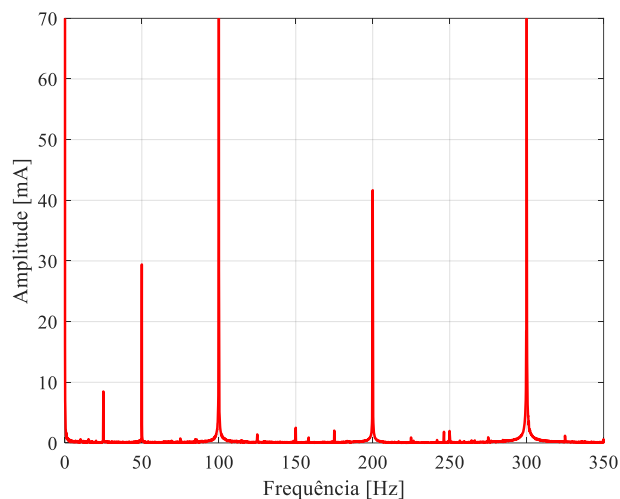


Figura A.6 - Método EPVA aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de Ø2mm na pista externa do rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.

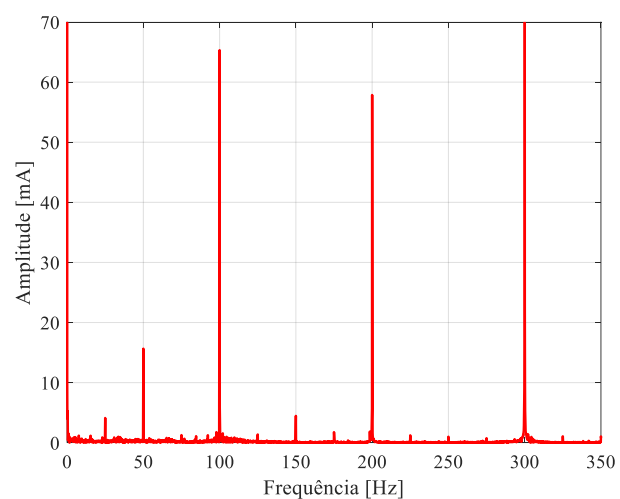


Figura A.7 - Método EPVA aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de Ø2mm na pista externa do rolamento SKF 6206-2Z, sem carga.

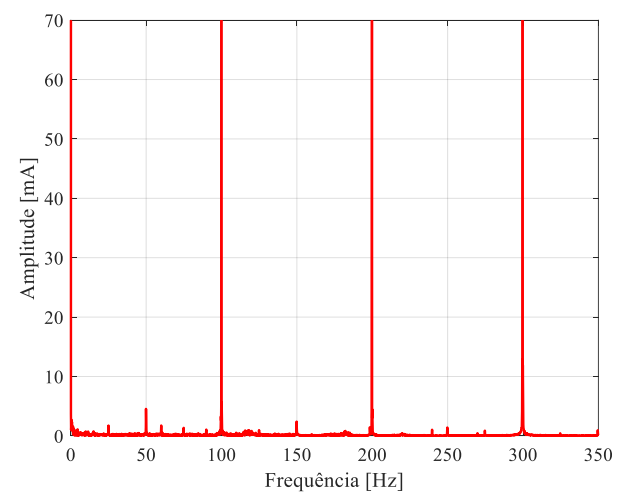


Figura A.8 - Método EPVA aplicado às correntes de alimentação do MI para o *pitting* por ED no rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.

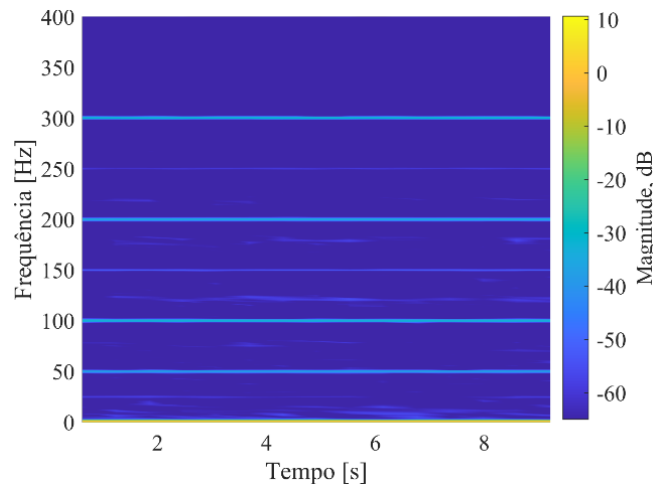


Figura A.9 - Método Híbrido aplicado às correntes de alimentação do MI para o estado saudável sem carga.

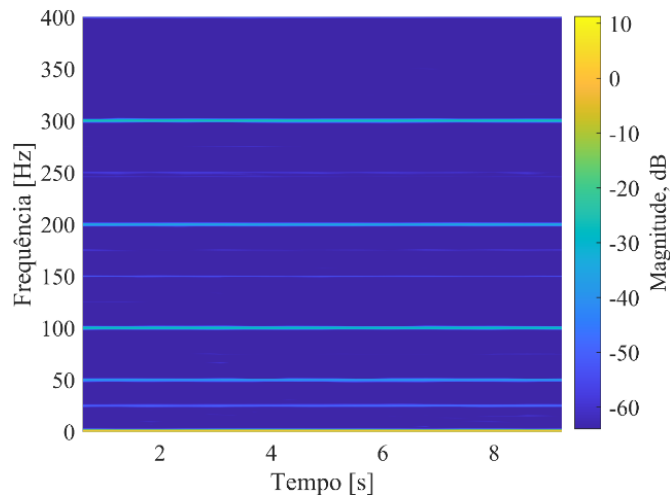


Figura A.10 - Método híbrido aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de $\varnothing 2\text{mm}$ na pista externa do rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.

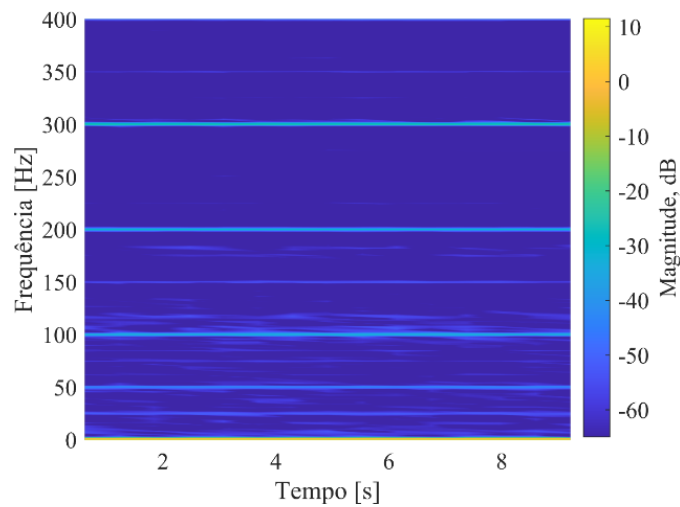


Figura A.11 - Método híbrido aplicado às correntes de alimentação do MI para o furo de $\varnothing 2\text{mm}$ na pista externa do rolamento SKF 6206-2Z, sem carga.

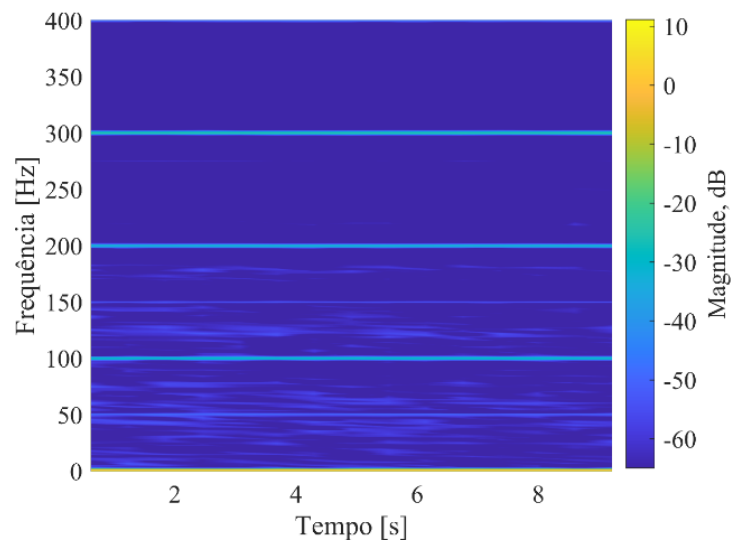


Figura A.12 - Método híbrido aplicado às correntes de alimentação do MI para o *pitting* por ED no rolamento SKF 6205-2Z, sem carga.