

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Pedro Miguel Lucas Rodrigues Freire Cavaleiro

**TENSÕES INDUZIDAS DIFERENCIAIS PARA O
DIAGNÓSTICO DE AVARIAS EM ROLAMENTOS DE
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Ramo de Especialização em Energia orientada pelo Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz e apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra no Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

Fevereiro de 2020



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

TENSÕES INDUZIDAS DIFERENCIAIS PARA O DIAGNÓSTICO DE AVARIAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Pedro Miguel Lucas Rodrigues Freire Cavaleiro

Membros do Júri:

Presidente: Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

Orientador: Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz

Vogal: Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira

Coimbra, fevereiro de 2020

Agradecimentos

Em primeiro lugar, um agradecimento especial ao Professor Doutor Sérgio Cruz pelo apoio, conhecimento, disponibilidade e honestidade demonstrados durante a realização deste trabalho. O seu espírito crítico, a atenção aos detalhes e os ensinamentos transmitidos durante todo o mestrado são ativos de valor incalculável.

Ao Pedro Gonçalves e ao Yassir El Karkri, os meus companheiros de laboratório, pela permanente disponibilidade manifestada e ajuda prestada e por terem tornado esta caminhada solitária menos penosa.

Aos meus amigos Filipe Conceição, Francisco Veiga, Diogo Caires, João Barreiros e José Pedro Costa pelas tão necessárias pausas para almoço, lanche, café ou apenas conversa. O vosso apoio foi, sem dúvida, determinante para o sucesso deste projeto.

À Sofia, o meu porto de abrigo, a minha confidente, a minha psicóloga. Obrigado por compreenderes as minhas ausências, físicas e psicológicas. Obrigado por todo o teu apoio e carinho durante este período desgastante. Sem ti nada disto seria possível. *In omnia paratus.*

À minha família, pelo apoio incondicional e compreensão durante todo este processo, especialmente pelas ausências e maus-humores, pelos conselhos e ajuda. O vosso contributo para este trabalho foi enorme.

Por fim, e não menos importante, ao Instituto de Telecomunicações por ter fornecido todo o material e condições para a realização deste trabalho.

Resumo

O diagnóstico precoce de avarias em sistemas eletromecânicos tem assumido uma maior relevância com a massificação destes sistemas em diversas áreas. Este tipo de diagnóstico não só minimiza impactos económicos importantes causados por paragens forçadas não planeadas como também pode constituir uma mais-valia ao nível da segurança em algumas aplicações. O diagnóstico de avarias mecânicas em motores elétricos não é um assunto novo e tem sido amplamente discutido ao longo das últimas décadas, com diversas aplicações daí resultantes.

O método das tensões induzidas diferenciais para o diagnóstico de avarias em rolamentos proposto neste documento é totalmente novo e baseia-se na análise de tensões induzidas diferenciais, medidas com o auxílio de bobinas de prova instaladas no estator de um motor de indução trifásico, para a deteção de anomalias no campo magnético no entreferro do motor causadas por avarias nos rolamentos. Este método tem revelado um grande potencial no diagnóstico de avarias no estator, avarias no rotor, e excentricidades no motor devido à elevada sensibilidade do campo magnético às pequenas alterações provocadas por tais avarias. As tensões induzidas diferenciais podem ser obtidas com ligeiras modificações no motor, através da instalação de seis bobinas de teste nas ranhuras do estator. Uma das mais valias deste método é a possibilidade de ser utilizado em ambientes onde a recolha dos sinais de vibração ou sinais acústicos não é possível.

O objetivo principal deste trabalho é pois identificar padrões de avaria típicos em rolamentos de motores de indução trifásicos com base na análise das tensões induzidas diferenciais, de forma a validar este novo método de diagnóstico na deteção deste tipo de avaria.

Palavras-chave: rolamentos, motor de indução trifásico, tensões induzidas, diagnóstico de avarias.

Abstract

Early diagnosis of malfunctions in electromechanical systems has assumed greater relevance with the massification of these systems in several applications. This type of diagnosis not only minimizes important economic impacts caused by unplanned forced stoppages, but can also provide added value in terms of safety in some applications. The diagnosis of mechanical malfunctions in electric motors is not a new issue and has been widely discussed over the last few decades, with several techniques resulting therefrom.

The differential induced voltages technique for the diagnosis of bearing failures proposed in this document is totally new and is based on the analysis of differential induced voltages, measured by search coils installed in the stator of a three-phase induction motor, for the detection of magnetic field anomalies in the motor air gap caused by bearing failures. This technique has revealed a great potential in the diagnosis of stator faults, rotor faults, and eccentricities in the motor due to the high sensitivity of the magnetic field to the small alterations caused by such faults. Differential induced voltages can be obtained with slight modifications to the motor, by installing six search coils in the stator slots. One of the advantages of this method is the possibility of being used in environments where the analysis of vibration or acoustic signals is not possible.

The main goal of this work is therefore to identify typical failure patterns in bearings of three-phase induction motors based on the analysis of the induced differential voltages, in order to validate this new diagnostic method in the detection of this type of failure.

Keywords: bearings, three-phase induction motor, induced voltages, fault diagnosis.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
SIMBOLOGIA	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. <i>Motivação e Enquadramento</i>	1
1.2. <i>Objetivos</i>	2
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1. <i>Avarias em Rolamentos</i>	5
2.2. <i>Deteção de Avarias em Rolamentos</i>	10
2.2.1. <i>Análise dos Sinais de Vibração da Carcaça do Motor</i>	10
2.2.2. <i>Análise Química do Lubrificante do Rolamento</i>	10
2.2.3. <i>Análise Térmica do Rolamento</i>	11
2.2.4. <i>Análise Acústica do Funcionamento do Rolamento</i>	11
2.2.5. <i>Análise da Pressão Sonora do Ruído Emitido pelo Rolamento</i>	11
2.2.6. <i>Análise de Movimento do Rolamento por Laser</i>	12
2.2.7. <i>Análise da Corrente de Alimentação do Motor</i>	12
3. TENSÕES INDUZIDAS DIFERENCIAIS	13
3.1. <i>Teoria Subjacente ao Método de Diagnóstico</i>	13
3.2. <i>Outros Estudos Relacionados</i>	14
3.3. <i>Análise Matemática do Campo Magnético</i>	15
3.4. <i>Implementação</i>	16
4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	19
4.1. <i>Montagem Experimental</i>	19
4.2. <i>Resultados Obtidos</i>	24
4.2.1. <i>Avaria Singular de 4 mm no Anel Externo</i>	24
4.2.2. <i>Avaria Singular de 2 mm no Anel Externo</i>	32
4.2.3. <i>Avaria Singular de 4 mm no Anel Interno</i>	36
4.2.4. <i>Avaria Singular de 2 mm no Anel Interno</i>	39
4.2.5. <i>Avaria Generalizada no Anel Externo e Interno</i>	42
4.2.6. <i>Avaria Generalizada no Anel Externo e Interno e Alimentação por Conversor de Frequência</i>	47
5. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO	51

5.1	<i>Conclusão</i>	51
5.2	<i>Trabalho Futuro</i>	53
BIBLIOGRAFIA		55
ANEXO I – TENSÕES INDUZIDAS DIFERENCIAIS DO MOTOR À MEIA CARGA		59
ANEXO II – CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS UTILIZADAS NO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL		63

Índice de Figuras

Figura 2.1-1 – Desalinhamentos provocados por montagem incorreta de rolamentos: (a) desalinhamento; (b) deflexão do eixo; c) pista externa inclinada; d) pista interna inclinada.	6
Figura 2.1-2 - Estrias resultantes da passagem de corrente por um rolamento.	6
Figura 2.1-3 - Constituição e dimensões de um rolamento.	7
Figura 3.1-1 - Exemplo de instalação das bobinas de teste num motor de indução trifásico de 4 polos.....	13
Figura 3.4-1 - Esquema de instalação das bobinas de prova no estator do motor.	16
Figura 4.1-1 - Diagrama da montagem experimental.	20
Figura 4.1-2 - Rolamentos com avaria: (a) furo de 4 mm no anel externo; (b) furo de 2 mm no anel interno.	20
Figura 4.1-3 - Montagem experimental.....	22
Figura 4.2-1 - Tensões induzidas nas espiras SU12 e SU34 para o motor em vazio com uma avaria de 4 mm no anel externo do rolamento do lado do ventilador.	25
Figura 4.2-2 - Tensão induzida diferencial da fase U no domínio do tempo para o motor em vazio e com uma avaria de 4 mm no anel externo do rolamento do lado do ventilador.	25
Figura 4.2-3 - Espetro da tensão induzida diferencial da fase U para o motor a funcionar em vazio com uma avaria de 4 mm no anel externo do rolamento do lado do ventilador.	25
Figura 4.2-4 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel externo, no rolamento do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	26
Figura 4.2-5 - Espetros da corrente e vibração para o funcionamento do motor em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador para: (a) corrente IR ; (b) vibração na direção radial.	27
Figura 4.2-6 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.	29
Figura 4.2-7 - Espetros da corrente e vibrações da carcaça para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, para: (a) corrente IR ; (b) vibração na direção radial.	30
Figura 4.2-8 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	32
Figura 4.2-9 - Espetros das correntes e vibrações da carcaça para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador para: (a) corrente IR ; (b) vibração na direção radial.	33

Figura 4.2-10 - Espectros representativos das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	35
Figura 4.2-11 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, para: (a) corrente <i>IR</i> ; (b) vibração na direção radial.	35
Figura 4.2-12 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	36
Figura 4.2-13 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) corrente <i>IR</i> ; (b) vibração na direção radial.	37
Figura 4.2-14 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	38
Figura 4.2-15 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) corrente <i>IR</i> ; (b) vibração na direção radial.	39
Figura 4.2-16 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	40
Figura 4.2-17 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) corrente <i>IR</i> ; (b) vibração na direção radial.....	40
Figura 4.2-18 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	42
Figura 4.2-19 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) corrente <i>IR</i> ; (b) vibração na direção radial.	42
Figura 4.2-20 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	43
Figura 4.2-21 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga para: (a) corrente <i>IR</i> ; (b) vibração na direção radial.	44
Figura 4.2-22 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	45

Figura 4.2-23 – Espetros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga para: (a) corrente <i>IR</i> ; (b) vibração na direção radial.	46
Figura 4.2-24 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	47
Figura 4.2-25 - Espetro da tensão diferencial relativa à fase U para o motor saudável e para o motor com uma avaria generalizada nos anéis externo e interno, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência. ..	48
Figura 4.2-26 - Espetros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência para: (a) corrente <i>IR</i> ; (b) vibração na direção do radial.....	48
Figura 4.2-27 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	49
Figura 4.2-28 - Espetros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência para: (a) corrente <i>IR</i> ; (b) vibração na direção radial.	49
Figura I-1 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel externo, no rolamento do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	59
Figura I-2 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel externo, no rolamento do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	59
Figura I-3 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel interno, no rolamento do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	60
Figura I-4 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel interno, no rolamento do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	60
Figura I-5 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	61
Figura I-6 - Espetros representativos das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência para: : (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.....	61

Índice de Tabelas

Tabela 1.1-1 - Percentagem de avarias de motores de indução por componente, comparação entre 3 estudos.	2
Tabela 4.1-1 - Dimensões dos rolamentos	21
Tabela 4.1-2 - Velocidade e frequência mecânica para diferentes regimes de carga do motor ensaiado.	23
Tabela 4.1-3 - Frequências características do rolamento 6205 para diferentes regimes de carga.	23
Tabela 4.1-4 - Frequências características do rolamento 6206 para diferentes regimes de carga.	23
Tabela 4.2-1 - Caracterização e numeração das avarias analisadas.....	24
Tabela 4.2-2 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em vazio com avaria de 4 mm no anel externo.....	28
Tabela 4.2-3 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para o método de diagnóstico baseado nas vibrações da carcaça do motor para o ensaio em vazio com avaria de 4 mm no anel externo.	29
Tabela 4.2-4 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio com carga elevada e com uma avaria de 4 mm no anel externo.....	31
Tabela 4.2-5 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para o método de diagnóstico baseado nas vibrações da carcaça do motor para o ensaio com carga elevada e com uma avaria de 4 mm no anel externo.....	31
Tabela 4.2-6 - Variação da amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em vazio com uma avaria de 2 mm no anel externo.....	34
Tabela 4.2-7 - Variação da amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para o método de diagnóstico baseado nas vibrações da carcaça do motor para o ensaio em vazio com uma avaria de 2 mm no anel externo.....	34
Tabela 4.2-8 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em vazio com avaria de 4 mm no anel interno.....	37
Tabela 4.2-9 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para o método de diagnóstico baseado nas vibrações da carcaça do motor para o ensaio em vazio com avaria de 4 mm no anel interno.....	38
Tabela 4.2-10 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em vazio com avaria de 2 mm no anel interno.....	41

Tabela 4.2-11 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para o método de diagnóstico baseado nas vibrações da carcaça do motor para o ensaio em vazio com avaria de 2 mm no anel interno.....	41
Tabela 4.2-12 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em vazio com avaria generalizada. Frequências relativas ao anel externo.	44
Tabela 4.2-13 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e na corrente de alimentação para o ensaio em vazio com uma avaria generalizada. Frequências relativas ao anel interno.	45
Tabela 4.2-14 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em carga elevada com avaria generalizada. Frequências relativas ao anel interno.	46
Tabela II-1 - Características técnicas do motor de indução trifásico	63
Tabela II-2 - Características técnicas da máquina de corrente contínua.....	63

Simbologia

e	força eletromotriz induzida	V
f_{BF}	frequência de uma avaria numa esfera do rolamento	Hz
f_{CF}	frequência de uma avaria na gaiola do rolamento	Hz
f_{IRF}	frequência de uma avaria no anel interno	Hz
f_{ORF}	frequência de uma avaria no anel externo	Hz
f_R	frequência mecânica de rotação do rotor	Hz
f_S	frequência de alimentação do motor	Hz
p	número de pares de polos	
s	deslizamento	
t	tempo	s
A	área	m^2
B	indução magnética	T
B_S	indução magnética no estator	T
B_{Sv}^m	magnitude do harmónico de ordem v da indução magnética do estator	T
N	número de espiras de uma bobina	
N_B	número de esferas do rolamento	
α_r	posição angular do rotor	rad
α_s	posição angular ao longo da periferia interna do estator	rad
α^{dn}	posição angular do menor comprimento do entreferro devido à excentricidade dinâmica	rad
α^{st}	posição angular do menor comprimento do entreferro devido à excentricidade estática	rad

θ	ângulo de contacto	rad
δ	comprimento médio do entreferro	m
δ_m^{dn}	variação máxima do entreferro provocada por excentricidade dinâmica	m
δ_m^{st}	variação máxima do entreferro provocada por excentricidade estática	m
ϕ	fluxo magnético	Wb
ω	frequência angular elétrica	rad/s
Ω_r	velocidade angular mecânica do rotor	rad/s

1. Introdução

1.1. Motivação e Enquadramento

Num mundo cada vez mais automatizado, o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico de avarias para motores elétricos tem assumido um lugar de destaque na investigação na área.

Existem na atualidade diversos tipos de motores elétricos, entre os quais se destaca o motor de indução trifásico. Inventado em 1880 por Nikola Tesla, o motor de indução trifásico é amplamente utilizado em acionamentos industriais, sistemas de bombagem, sistemas de tração, entre outros. Este tipo de máquina elétrica tem como vantagem a sua fiabilidade, simplicidade, flexibilidade e custo reduzido em relação a outros tipos de motores elétricos.

Pelos motivos descritos anteriormente, mais de 90% dos motores elétricos utilizados em ambiente industrial são motores de indução trifásicos [1]. A grande maioria destes motores encontram-se inseridos em processos industriais complexos que congregam diversos componentes. Estes processos em ambiente industrial decorrem, em muitos casos, em condições adversas ao funcionamento dos motores elétricos, como temperaturas elevadas, ambientes poluídos e corrosivos, entre outros.

Devido às condições adversas de funcionamento a que o motor se encontra sujeito, verifica-se um elevado desgaste de diversos elementos do motor, o que leva à ocorrência de avarias de natureza mecânica ou elétrica que podem causar paragens inesperadas do processo, originando custos de manutenção e de paragem da produção potencialmente elevados.

As avarias mais comuns nos motores de indução trifásicos têm origem nos rolamentos, nos enrolamentos do estator e nas barras rotóricas. Conforme se verifica na Tabela 1.1-1, onde são comparados os resultados obtidos em 3 estudos, as avarias em rolamentos são das que apresentam maior número de ocorrências, entre 13% e 44% do total de avarias para os motores analisados [2].

Tabela 1.1-1 - Percentagem de avarias de motores de indução por componente, comparação entre 3 estudos [3].

Componentes	IEEE-IAS	EPRI	ALLIANZ
Principais	(%)	(%)	(%)
Rolamentos	44	41	13
Estator	26	36	66
Rotor	8	9	13
Outros	22	14	8

A deteção de avarias mecânicas assume um papel preponderante num sistema de diagnóstico. Na deteção de avarias no motor, são habitualmente analisados sinais de vibração provenientes de sensores de vibração instalados na sua carcaça, sinais elétricos provenientes do sistema de alimentação do motor e medição de temperatura [2]. À análise destes sinais estão geralmente associadas técnicas de processamento de sinal, que permitem o tratamento e observação dos dados adquiridos e posterior diagnóstico da avaria. No entanto, a obtenção dos sinais de vibração obriga a que seja necessário estabelecer contacto com a carcaça do motor, consistindo deste modo num método invasivo, sendo que a colocação de sensores de vibração na carcaça dos motores nem sempre é possível ou prática, especialmente quando há um elevado número de motores numa dada instalação. Neste contexto, são preferidos os sistemas de diagnóstico baseados em sinais elétricos, visto que, para além de serem adquiridos de forma simples, possibilitam a deteção de diferentes tipos de avaria [4].

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem por objetivo o estudo de um novo método de deteção de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos, tendo por base a medição das tensões induzidas em bobinas de teste instaladas no estator da máquina a partir das quais são calculadas tensões induzidas diferenciais, as quais, após processamento adequado, poderão potencialmente permitir a deteção e identificação de avarias nos rolamentos do motor. O método de diagnóstico em estudo tem revelado um enorme potencial no diagnóstico de avarias estatóricas e rotóricas. O objetivo deste trabalho é incluir as avarias em rolamentos neste promissor método de diagnóstico.

Este trabalho envolve:

- Análise das tensões induzidas diferenciais nas bobinas de teste instaladas no estator de um motor de indução trifásico em condições normais de funcionamento e quando o motor possui diferentes tipos de avaria nos respetivos rolamentos;
- Aplicação de técnicas de processamento de sinal na deteção de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos;
- Comparação dos resultados obtidos após análise com outros métodos de diagnóstico de avarias em rolamentos já existentes, de forma a comprovar a viabilidade da solução proposta.

2. Estado da Arte

Este capítulo descreve o estado da arte na área da detecção de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos. Para tal, são descritas as avarias típicas em rolamentos de motores elétricos, bem como as técnicas atualmente existentes no mercado para detecção de avarias em rolamentos.

2.1. Avarias em Rolamentos

De forma a garantir um correto diagnóstico de avarias em rolamentos, é necessária uma análise aprofundada do rolamento quer do ponto de vista da sua conceção, quer do seu funcionamento.

Um rolamento é constituído por dois anéis, um interno e um externo, entre os quais um conjunto de esferas ou rolos rodam em pistas. Em condições normais de operação com correto alinhamento e carga equilibrada, surgem pequenas fissuras localizadas abaixo da superfície das pistas e das esferas. Estas fissuras alastram gradualmente até à superfície e provocam vibrações detetáveis e aumento do ruído de funcionamento. Esforços continuados levam à libertação de fragmentos de material, que produz um fenómeno de fadiga localizada conhecido como escamação ou lascamento [5], [6]. Esta fadiga propaga-se pela superfície e leva à contaminação do lubrificante do rolamento. Esta contaminação irá provocar um funcionamento irregular do rolamento a curto prazo. Apesar de esta ser a avaria mais comum em rolamentos, existem ainda outros fenómenos externos que reduzem a vida útil dos rolamentos. Estes fenómenos externos são essencialmente contaminação e corrosão. Motores de indução são frequentemente operados em condições difíceis, sendo que corpos estranhos, água, ácidos e humidade são os principais fatores de deterioração [5], [6]. Contaminação e corrosão aceleram frequentemente as avarias dos rolamentos devido aos ambientes severos presentes na maioria dos ambientes industriais. Poeiras e outras matérias estranhas que estão comumente presentes nestes ambientes contaminam frequentemente a lubrificação do rolamento, caso este não seja blindado. A natureza abrasiva dessas partículas causa corrosão e lixamento que levam ao desgaste mensurável das esferas e das pistas. A corrosão do rolamento é provocada pela presença de água, ácidos, lubrificação deteriorada e até transpiração devido ao manuseamento descuidado durante a instalação [5], [6]. A reação química provoca desgaste e libertação de partículas resultando no mesmo efeito abrasivo produzido pela contaminação do rolamento. Lubrificação inadequada

pode resultar tanto de lubrificação deficiente como de lubrificação excessiva. Em qualquer dos casos, as esferas não são convenientemente lubrificadas pela película de óleo, o que provoca aquecimento excessivo do rolamento e deterioração do óleo lubrificante, resultando num elevado desgaste do rolamento. Uma incorreta instalação do rolamento pode também provocar uma avaria precoce devido a desalinhamentos ou danos provocados no rolamento durante a instalação [5], [6]. Na Figura 2.1-1 estão ilustrados diferentes desalinhamentos provocados por montagem incorreta dos rolamentos.

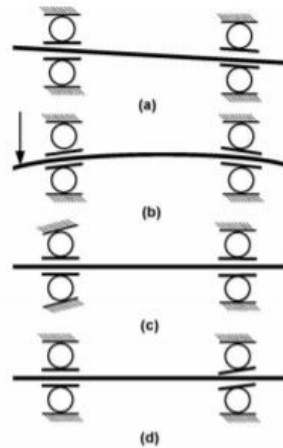


Figura 2.1-1 – Desalinhamentos provocados por montagem incorreta de rolamentos: (a) desalinhamento; (b) deflexão do eixo; c) pista externa inclinada; d) pista interna inclinada [5], [6].

Outra causa de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos é a circulação de correntes através do rolamento, especialmente em motores alimentados por conversores de frequência. O aumento da vibração e do ruído são sintomas típicos desta avaria [7]. Os efeitos da circulação de correntes através dos rolamentos podem ser observados na Figura 2.1-2.

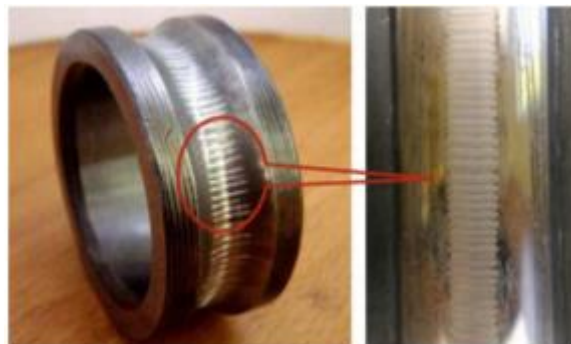


Figura 2.1-2 - Estrias resultantes da passagem de corrente por um rolamento [5].

Em [8] os avarias em rolamentos são classificados em duas categorias: avarias singulares e avarias generalizadas. Os avarias singulares caracterizam-se como sendo localizados e com frequências resultantes conhecidas. Este tipo de anomalias pode ser provocado por uma fissura,

depressão ou uma deformação na estrutura do rolamento ou das esferas. Os avarias generalizados num rolamento resultam da falta de lubrificação interna, contaminação ou corrosão por partículas provenientes do exterior do motor ou até mesmo devido a uma má instalação do rolamento bem como à passagem de correntes elétricas pelo rolamento. Este tipo de anomalias não surge associado a frequências que as permitam identificar, sendo mais comum a sua manifestação através de uma maior intensidade da vibração em gamas de frequência alargadas e de difícil previsão [8]. Na Figura 2.1-3 encontram-se as dimensões do rolamento essenciais para o cálculo das frequências de avaria, bem como a construção típica de um rolamento.

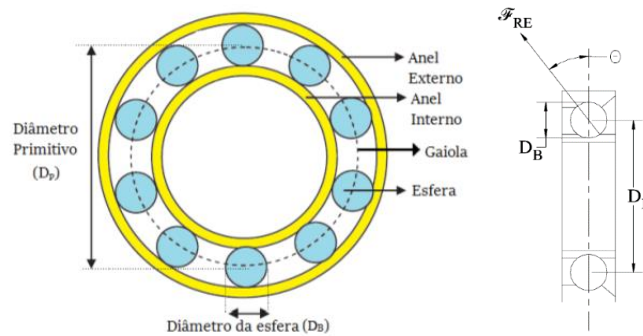


Figura 2.1-3 - Constituição e dimensões de um rolamento [8-12].

As frequências dadas pelas equações (2.1)-(2.4) resultam da vibração provocada pela avaria em um ou mais componentes do rolamento. Estas frequências dependem de diversos fatores, tais como as dimensões do rolamento, assim como da velocidade de rotação do veio da máquina [2], [8-13].

$$f_{CF} = \frac{1}{2} f_R \left(1 - \frac{D_B \cos \theta}{D_P} \right) \quad (2.1)$$

$$f_{ORF} = \frac{N_B}{2} f_R \left(1 - \frac{D_B \cos \theta}{D_P} \right) \quad (2.2)$$

$$f_{IRF} = \frac{N_B}{2} f_R \left(1 + \frac{D_B \cos \theta}{D_P} \right) \quad (2.3)$$

$$f_{BF} = \frac{D_P}{2D_B} f_R \left(1 - \frac{D_B^2 \cos^2 \theta}{D_P^2} \right), \quad (2.4)$$

Onde f_{CF} representa a frequência de avaria na gaiola do rolamento, f_R a frequência mecânica de rotação do motor, D_B representa o diâmetro das esferas do rolamento, D_P o diâmetro primitivo do rolamento, θ o ângulo de contacto, f_{ORF} a frequência de avaria no anel externo, N_B o número de esferas do rolamento, f_{IRF} a frequência de avaria no anel interno e f_{BF} a frequência de avaria nas esferas.

Sendo difícil determinar com exatidão as características do rolamento em estudo, é possível obter uma aproximação para as frequências características para rolamentos com 6 a 12 esferas, dadas por [10], [12], [14]:

$$f_{ORF} = 0.4 * N_B * f_R \quad (2.5)$$

$$f_{IRF} = 0.6 * N_B * f_R \quad (2.6)$$

Um dos fenômenos resultantes das avarias nos rolamentos é a excentricidade do motor. A excentricidade de um motor é uma condição que ocorre quando existe um comprimento do entreferro não uniforme ou assimétrico. No caso da excentricidade estática, o centro geométrico do rotor coincide com o centro de rotação, mas está deslocado do centro geométrico do estator. Desta forma, a distância mínima do entreferro é constante e sempre na mesma posição angular (Figura 2.1-4 (b)). Para a excentricidade dinâmica, o centro geométrico do rotor coincide com o centro geométrico do estator mas não coincide com o centro de rotação. Ambos os tipos de excentricidade coexistem em máquinas elétricas (fenômeno denominado por excentricidade mista) e estão ilustrados na Figura 2.1-4. Devido ao comprimento reduzido do entreferro de um motor de indução, estes revelam-se mais sensíveis a excentricidades [15], [16].

Excentricidades produzem forças magnéticas radiais desequilibradas que tentam afastar o centro do rotor do centro do estator [17], o que provoca um desgaste acelerado de diversos componentes tais como os rolamentos [15].

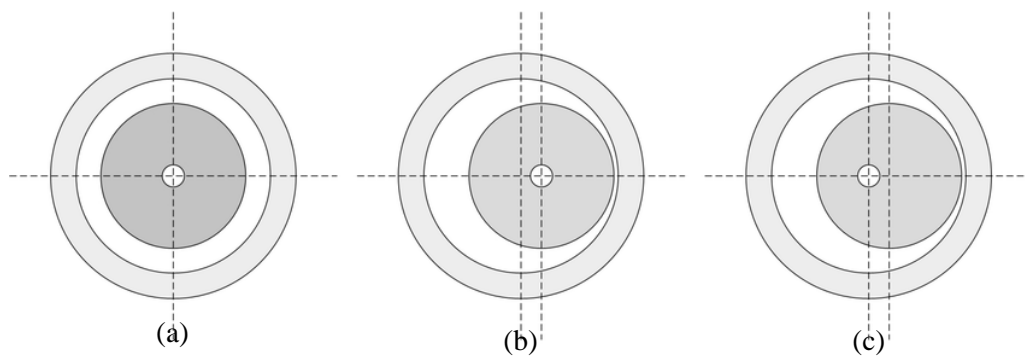


Figura 2.1-4 - Tipos de excentricidade de um motor: (a) motor concêntrico; (b) excentricidade estática; (c) excentricidade dinâmica [16], [17], [18].

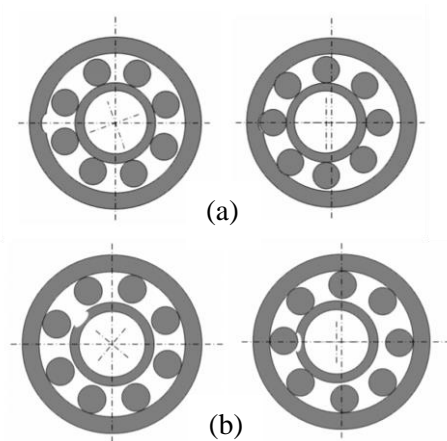


Figura 2.1-5 - Efeitos de diferentes avarias no rolamento na excentricidade de um motor elétrico: (a) dinâmica de um avaria no anel externo do rolamento; (b) dinâmica de um avaria no anel interno [16].

De acordo com Ozelgin, os tipos de excentricidades têm uma relação direta com diferentes tipos de avarias em rolamentos. É sabido, através das equações (2.1) a (2.4), que diferentes avarias em rolamentos têm frequências de vibração características. Como consequência da vibração, os movimentos do rotor provocam alterações no comprimento do entreferro. Avarias no anel externo do rolamento provocam excentricidade estática do rotor, uma vez que o anel exterior não roda com o rotor, como pode ser observado na Figura 2.1-5. Avarias no anel interno têm um comportamento diferente, uma vez que o anel interno roda com o rotor, de onde resulta um fenómeno de excentricidade dinâmica [16].

A Figura 2.1-6 sumariza, de uma forma geral, os efeitos de uma avaria num rolamento no motor.

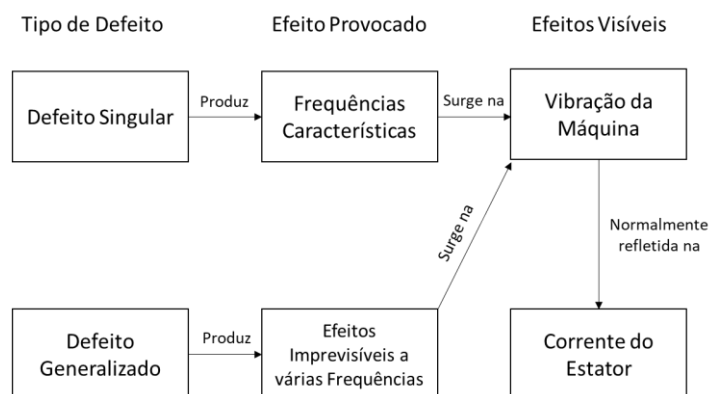


Figura 2.1-6 - Esquematização dos efeitos de cada tipo de avaria de rolamentos num motor [8].

2.2. Detecção de Avarias em Rolamentos

Devido à sua relevância, a deteção de avarias tem sido um tema amplamente estudado pela comunidade de investigadores da área da Engenharia Eletrotécnica. Destes estudos têm surgido várias abordagens à temática da deteção de avarias em rolamentos.

2.2.1. Análise dos Sinais de Vibração da Carcaça do Motor

Tal como referido na secção anterior, uma das manifestações das avarias de natureza mecânica é o aumento do nível de vibração da carcaça do motor. No diagnóstico de avarias em rolamentos, é comum a utilização de acelerómetros para a obtenção dos sinais de vibração da carcaça do motor. Considerando as expressões (2.5) e (2.6), as frequências características de avaria no anel externo e interno do rolamento, associadas aos sinais de vibração recolhidos na carcaça do motor, são dadas pelas seguintes expressões [9], [12], [19]:

$$f_{BPO} = k * f_{ORF}, k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.7)$$

$$f_{BPI} = \pm f_{IRF} + m * f_R, m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.8)$$

O método da análise dos sinais de vibração da carcaça do motor tem sido reconhecido como um método fiável para deteção de avarias em rolamentos, tendo sido inclusivamente criado uma norma para este método, a norma ISO 20816-1 [20]. No entanto, este método apresenta algumas desvantagens tais como o custo elevado [21], a necessidade de acesso ao motor bem como a durabilidade dos sensores de vibração [22].

2.2.2. Análise Química do Lubrificante do Rolamento

Os lubrificantes dos rolamentos, quando degradados pelo calor, libertam grandes quantidades de substâncias químicas. Além disso, quando há uma degradação do rolamento, o seu lubrificante não só contém produtos da sua própria degradação como também contém resíduos da degradação do rolamento [23]. Porém, o conteúdo do lubrificante de um rolamento só é possível de analisar em máquinas de grande dimensão (acima de 50 kW), quando o óleo lubrificante é circulante e acessível para testes. Em máquinas de pequena e média dimensão não é prática esta análise uma vez que o lubrificante é incluído no próprio rolamento [22].

2.2.3. Análise Térmica do Rolamento

A análise térmica do rolamento é outro dos métodos já propostos para detecção de avarias neste componente. Quando é registado um aumento de temperatura de funcionamento do rolamento este pode ser provocado pela degradação do lubrificante. Outros fatores podem condicionar a temperatura do rolamento, tais como o aumento da temperatura do estator, a velocidade de rotação do motor, entre outros [24]. A temperatura é, portanto, um forte indicador das condições de funcionamento do rolamento [25]. Contudo, a inclusão de sensores de temperatura no rolamento é complexa e mesmo conseguindo medir a temperatura do rolamento é necessária uma investigação mais aprofundada para apurar as causas do aumento do valor da mesma [22].

2.2.4. Análise Acústica do Funcionamento do Rolamento

A análise acústica do funcionamento do rolamento tem sido sugerida como um método alternativo de detecção de avarias em rolamentos. Em algumas aplicações em ambientes de elevado nível de ruído e vibração o método de análise das vibrações da carcaça do motor revelou limitações. Para este método é proposta a análise de ondas sonoras de frequência superior a 100 kHz, onde a razão entre sinal e ruído é favorável em relação à análise de baixa frequência dos sistemas baseados em análise de vibrações. Esta técnica tem como principal vantagem a detecção de fissuras abaixo da superfície do rolamento [13]. Este método tem consideráveis limitações práticas como a localização dos sensores, o processamento do sinal de alta frequência e o elevado custo desta solução [22], [26].

2.2.5. Análise da Pressão Sonora do Ruído Emitido pelo Rolamento

Uma vez que a degradação dos rolamentos provoca a emissão de ruído, o método da análise da pressão sonora do ruído emitido pelo rolamento tem sido proposto para monitorização das suas condições de funcionamento [27]. Este método consiste na análise de ondas sonoras emitidas pelo rolamento na gama de 0-20 kHz uma vez que, tal como nos métodos de diagnóstico baseados em análise de vibração, existem frequências características emitidas pelo rolamento em caso de avaria. Este método tem como vantagem não ser invasivo como outros métodos referidos anteriormente. No entanto, em ambientes com elevado ruído ambiente é necessário isolar o ruído de funcionamento do rolamento de outros ruídos. Desta forma, torna-se pouco prática a detecção de avarias em rolamentos em ambientes ruidosos com vários motores a funcionar em simultâneo [22].

2.2.6. Análise de Movimento do Rolamento por Laser

Uma vez que o deslocamento anormal do rolamento é habitualmente calculado através de medições obtidas por acelerómetros, é possível que haja imprecisões no cálculo do movimento do rolamento. De forma a eliminar estes erros, em [28] é proposto um método baseado na medição da posição através de um sensor laser. Todavia, a colocação de um sensor de medição laser no rolamento não se revela uma solução de simples implementação [22].

2.2.7. Análise da Corrente de Alimentação do Motor

A análise da corrente de alimentação do motor é uma ideia atrativa para deteção de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos devido à sua facilidade de implementação, uma vez que os sinais de corrente estão já disponíveis nos dispositivos de proteção e conversores de alimentação, o que elimina a necessidade de instalação de sensores adicionais, com marcadas vantagens económicas [22], [23]. Uma outra vantagem da análise das correntes de alimentação do motor é a possibilidade de identificar outras avarias além das dos rolamentos [22]. Tal como para os sinais de vibração, para proceder à análise de sinais elétricos de alimentação do motor é necessário determinar as frequências características para cada tipo de avaria, tendo como referência as frequências determinadas em (2.7) e (2.8), seguindo o modelo de Blödt [12]. A estas frequências encontra-se associada a frequência característica da alimentação do motor, f_s . Assim, as expressões que traduzem as frequências características das avarias no anel externo e interno são [9], [12], [19]:

$$f_{IBPO} = |f_s \pm k * f_{ORF}|, k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.9)$$

$$f_{IBPI} = |f_s \pm f_R \pm k * f_{IRF}|, k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.10)$$

Como principal desvantagem do método da análise das correntes de alimentação do motor está a ténue alteração dos sinais de corrente na presença de uma avaria. Se para avarias singulares do rolamento é possível identificar as pequenas alterações na assinatura da corrente do motor, para avarias generalizados o diagnóstico baseado na análise de corrente revela-se difícil [22]. Mais ainda, em motores alimentados por conversores de eletrónica de potência os harmónicos resultantes da comutação dos semicondutores pode impossibilitar o diagnóstico de avarias através da corrente de alimentação [29].

3. Tensões Induzidas Diferenciais

Outro método de diagnóstico de diversos tipos de avarias em motores propõe-se utilizar como variável o fluxo magnético do motor. Existem dois tipos de análise do fluxo magnético do motor: análise do fluxo de fugas e análise do fluxo principal do motor [29]. Estes métodos consistem na utilização de bobinas de prova instaladas exteriormente, no caso do fluxo de fugas, e no estator no caso do fluxo principal para medição do fluxo com o objetivo de detetar alterações nos padrões de funcionamento normal do motor [29], [30].

3.1. Teoria Subjacente ao Método de Diagnóstico

O método proposto neste documento para deteção de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos consiste na análise do fluxo magnético do motor através da medição das tensões induzidas diferenciais por bobinas de prova colocadas no estator do motor. As tensões diferenciais resultam da diferença entre duas tensões medidas por bobinas de prova distanciadas de 360 graus elétricos entre si e alinhadas com os polos magnéticos correspondentes. Em condições ideais, com enrolamentos iguais e distribuídos, o campo magnético é semelhante em cada par de polos e conseqüentemente as tensões registadas por cada bobina são semelhantes. Quando existe uma avaria num componente do motor ou excentricidade, o campo magnético será perturbado na região da avaria, resultando em leituras diferentes de tensão para cada bobina, registadas por diferenças nas tensões diferenciais.

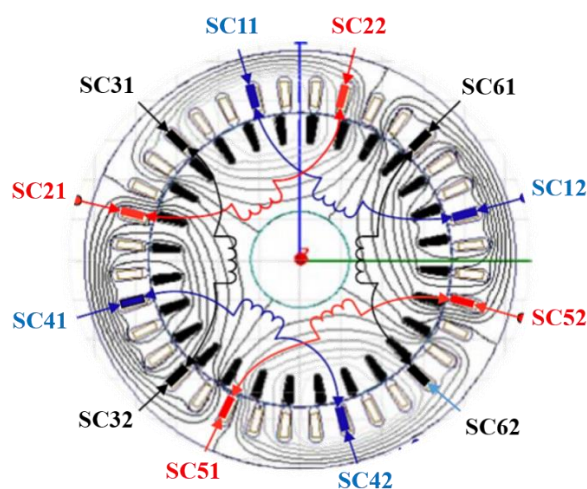


Figura 3.1-1 - Exemplo de instalação das bobinas de teste num motor de indução trifásico de 4 polos [31].

Tomando como exemplo o motor trifásico tetrapolar da Figura 3.1-1 sem, no entanto, deixar de poder ser generalizado para outras configurações, as bobinas de prova foram instaladas num par de polos de cada fase, geometricamente alinhadas com o centro do campo magnético, com o objetivo de analisar o campo magnético relativo a cada fase de alimentação. Este pode ser observado através da tensão induzida diferencial entre as bobinas de prova instaladas no estator do motor, uma vez que uma variação na sua amplitude tem uma influência direta nas tensões medidas. Estas tensões induzidas diferenciais são dadas por [29], [32].

$$\Delta E_U = E_{SC11-12} - E_{SC41-42} \quad (3.1)$$

$$\Delta E_V = E_{SC21-22} - E_{SC51-52} \quad (3.2)$$

$$\Delta E_W = E_{SC31-32} - E_{SC61-62} \quad (3.3)$$

A análise das tensões induzidas diferenciais permite obter informação sobre as condições de funcionamento do motor.

3.2. Outros Estudos Relacionados

Devido ao comportamento do campo magnético na presença de perturbações do funcionamento dos motores, vários estudos focados neste têm vindo a ser publicados, com diferentes abordagens para o mesmo problema.

Em [30] são apresentadas comparações do fluxo magnético para de um motor de indução trifásico de 11 kW, 4 polos e 36 ranhuras, entre um estado saudável e com excentricidade presente.

Noutro estudo foram simuladas no espaço e no tempo as componentes estatóricas e rotóricas do fluxo magnético para um motor saudável, para um motor com excentricidade estática e para um motor com excentricidade dinâmica [15]. Neste ensaio é visível o efeito da excentricidade no fluxo magnético.

No estudo realizado em [16], foi realizada uma simulação do espectro do fluxo magnético para diferentes tipos de avaria de um rolamento de um motor de indução trifásico bipolar, com frequência de alimentação de 50 Hz e frequência de rotação de 45 Hz. O rolamento tinha como características o diâmetro das esferas de 12 mm, diâmetro do anel interno de 40 mm, diâmetro do

anel externo de 80 mm e 9 esferas. Foram obtidos espectros de fluxo magnético, com as frequências obtidas através de simulação para avarias no anel externo e interno do rolamento.

Em [32] é analisada a influência de avarias no estator no campo magnético e em [31] é estudada a influência de barras rotóricas partidas no campo. Nos dois estudos são apresentadas técnicas de diagnóstico baseadas nas tensões induzidas diferenciais. Em ambos, a análise do campo magnético é em tudo semelhante à efetuada nesta dissertação bem como a implementação da técnica em motores de indução trifásicos.

3.3. Análise Matemática do Campo Magnético

O fluxo magnético pode ser utilizado para deteção de avarias devido à sua grande sensibilidade a perturbações na geometria do motor, uma vez que se torna perceptível qualquer alteração da espessura do entreferro devido a um movimento anormal do rotor [29], [30]. Em [15] isto é comprovado através das equações de fluxo magnético para um motor de indução saudável. Analiticamente, as excentricidades do motor são dadas por:

$$\delta(\alpha_s) = \delta - \delta_m^{st} \cos(\alpha_s - \alpha^{st}) - \delta_m^{dn} \cos(\alpha_s - \alpha^{dn} - \Omega_r t) \quad (3.4)$$

Com δ sendo o comprimento médio do entreferro, δ_m^{st} a variação máxima do entreferro provocada por excentricidade estática, δ_m^{dn} a variação máxima do entreferro provocada por excentricidade dinâmica, α_s posição angular ao longo do estator, α^{st} a posição angular de menor comprimento do entreferro por excentricidade estática, α^{dn} a posição angular de menor comprimento do entreferro por excentricidade dinâmica, Ω_r a velocidade angular de rotação do rotor e t o tempo. O fluxo do motor na presença de excentricidade mista é dado em [15] por:

$$\begin{aligned} B(\alpha_s) = & B_{s1}^m [1 + \delta_m^{st} \cos(\alpha_s - \alpha^{st})] \sin(\omega t - p\alpha_s) \\ & + \frac{B_{s1}^m \delta_m^{dn}}{2} \sin \left[\omega t \frac{p-1+s}{p} - (p-1)\alpha_s - \alpha^{dn} \right] \\ & + \frac{B_{s1}^m \delta_m^{dn}}{2} \sin \left[\omega t \frac{p+1-s}{p} - (p+1)\alpha_s + \alpha^{dn} \right]. \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}
B(\alpha_r) = & B_{s1}^m \sin(s\omega t - p\alpha_r) [1 + \delta_m^{dn} \cos(\alpha_r - \alpha^{dn})] \\
& + \frac{B_{s1}^m \delta_m^{st}}{2} \sin \left[\omega t \frac{s(p-1)+1}{p} - (p-1)\alpha_r - \alpha^{st} \right] \\
& + \frac{B_{s1}^m \delta_m^{st}}{2} \sin \left[\omega t \frac{s(p+1)-1}{p} - (p+1)\alpha_r + \alpha^{st} \right].
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Onde B_{sv}^m representa a magnitude do harmónico de ordem V da indução magnética no estator, ω a frequência angular elétrica, p o número de pares de polos, s o deslizamento e α_r a posição angular do rotor. Todo o processo de dedução das equações anteriores pode ser consultado em detalhe em [15] e [33].

As variações do fluxo magnético provocadas pelas excentricidades do rotor são de seguida medidas pelas 6 bobinas de prova instaladas no rotor de acordo com a lei de Faraday [29]:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = NA \frac{dB}{dt} \tag{3.7}$$

3.4. Implementação

Como referido no início deste capítulo, o método proposto nesta dissertação para a análise do fluxo magnético do motor baseia-se na medição das tensões induzidas por seis bobinas de prova instaladas no estator do motor, como ilustrado na Figura 3.4-1, para um motor com 4 polos e 36 ranhuras. O número de espiras de cada bobina será determinado pela instrumentação utilizada, uma vez que dele dependem as amplitudes das tensões induzidas obtidas.

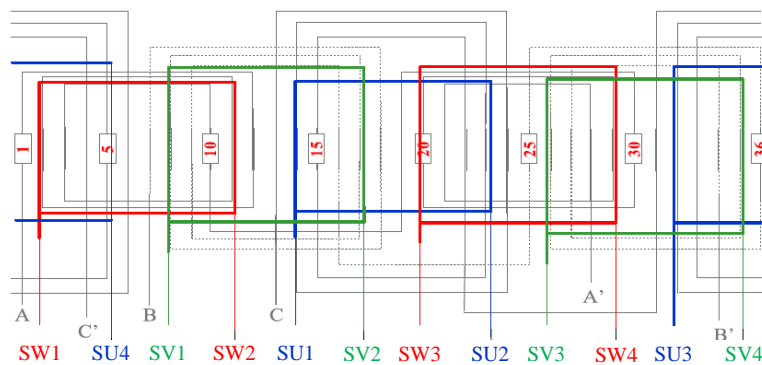


Figura 3.4-1 - Esquema de instalação das bobinas de prova no estator do motor [32].

Destas tensões induzidas resultam três tensões diferenciais, cada uma correspondente a uma fase do motor. As tensões diferenciais resultam da diferença entre as duas tensões medidas por

cada par de bobinas de prova relativas a uma fase. Assim, as tensões diferenciais são dadas pelas equações:

$$\Delta E_U = E_{SU12} - E_{SU34} \quad (3.8)$$

$$\Delta E_V = E_{SV12} - E_{SV34} \quad (3.9)$$

$$\Delta E_W = E_{SW12} - E_{SW34} \quad (3.10)$$

Num motor ideal cada uma das tensões induzidas diferenciais seria nula, uma vez que a ausência de qualquer perturbação do campo magnético permitiria, em teoria, que este se mantivesse constante, ou seja, que todas as tensões induzidas nas bobinas de prova relativas a uma fase fossem iguais, isto é, $E_{SU12} = E_{SU34}$, $E_{SV12} = E_{SV34}$ e $E_{SW12} = E_{SW34}$. No entanto, esta condição não se verifica na realidade, uma vez que o campo magnético do motor é afetado por fatores tais como excentricidades intrínsecas do motor ou imperfeições no circuito magnético que provocam desequilíbrios nas tensões induzidas entre espiras. Estes desequilíbrios nas tensões induzidas poderiam provocar uma diminuição na sensibilidade do método de diagnóstico. Por esta razão, é necessário implementar um sistema que permita remover estas pequenas diferenças entre as diferentes tensões induzidas [32].

Para esse fim pode ser realizada uma comparação das tensões induzidas individuais e normalizá-las através da fórmula:

$$E'_j(t) = \frac{\max(E_k)}{E_j(t)} * E_j(t) = K_j * E_j(t), \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (3.11)$$

Onde $E'_j(t)$ corresponde à tensão induzida j após a normalização, $E_j(t)$ a tensão induzida j real, E_k cada uma das seis tensões induzidas nas bobinas e K_j a constante de normalização para a tensão induzida j . É importante que as constantes K se mantenham sempre constantes e relativas ao funcionamento saudável do motor, com o objetivo de eliminar apenas as excentricidades intrínsecas do motor e não aquelas provocadas pela avaria do rolamento.

Após a normalização das tensões induzidas e obtidas as respectivas tensões induzidas diferenciais, são obtidos os espectros de cada uma das tensões induzidas diferenciais, com recurso a FFT. Estes espectros são posteriormente analisados e utilizados para a identificação das avarias em estudo. Uma vez que as alterações da assinatura de corrente na presença de uma avaria num rolamento são provocadas pela alteração do campo magnético, neste estudo foram utilizadas as equações (2.9) e (2.10) para a análise espectral e identificação das componentes de frequência das avarias.

Apesar de ser uma técnica invasiva para medir o fluxo magnético, esta apresenta diversas vantagens que tornam interessante a sua utilização [29-33]:

- As leituras não são afetadas por desequilíbrios entre fases de alimentação;
- Não afetado pelo binário de carga;
- Imune a perturbações provocadas por campos magnéticos exteriores;
- Elevada sensibilidade;
- Pode ser implementado com processamento de dados simples;
- Pode ser usado para detetar outras avarias, tais como avarias no estator ou nas barras rotóricas;
- Não necessita de transformadores de tensão ou de corrente, ou seja, não é afetado por avarias e características de funcionamento deste tipo de componentes.

4. Ensaaios Experimentais

Após a análise teórica do método das tensões induzidas diferenciais para o diagnóstico de avarias em rolamentos, neste capítulo é descrita a montagem experimental utilizada para a validação do método de diagnóstico bem como os resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados.

4.1. Montagem Experimental

De forma a analisar a viabilidade da técnica proposta para o diagnóstico de avarias em rolamentos, foi concebido um sistema com vista à aquisição de sinais elétricos e de vibração associados ao motor de indução em estudo, cujas características nominais se encontram mencionadas no ANEXO I. O esquema da montagem experimental utilizada encontra-se ilustrado na Figura 4.1-1.

O motor de indução trifásico de 3 kW tem os enrolamentos estatóricos ligados em triângulo e é alimentado pela rede trifásica, com uma tensão composta de 380 V, 50 Hz, controlada por um autotransformador. O motor foi acoplado mecanicamente a um gerador de corrente contínua de 4 kW (características nominais presentes no ANEXO I), ligado a uma carga resistiva. O gerador funciona com circuito de excitação separado. Através da regulação da corrente de excitação do gerador, é possível analisar o comportamento do motor para diferentes níveis de carga, caracterizados pela velocidade de rotação do grupo motor/gerador.

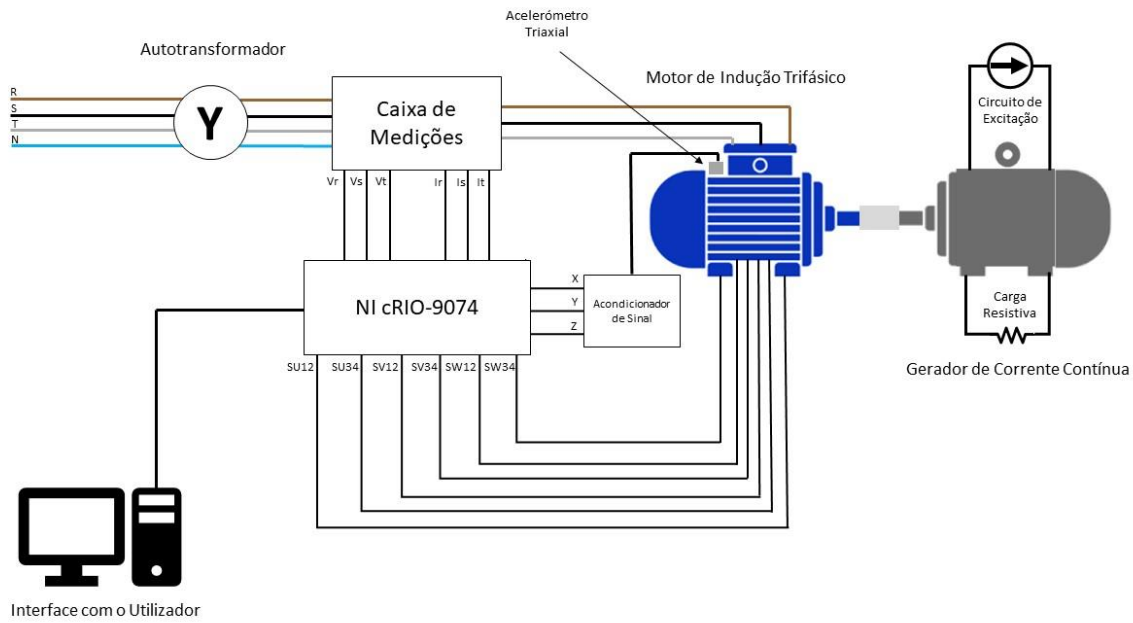


Figura 4.1-1 - Diagrama da montagem experimental.

Para a identificação das avarias nos rolamentos, foram simuladas avarias em diversos rolamentos [34], distinguindo-se cada um segundo a localização da avaria e o seu grau de severidade.



(a)

(b)

Figura 4.1-2 - Rolamentos com avaria: (a) furo de 4 mm no anel externo; (b) furo de 2 mm no anel interno.

Foram utilizados nos ensaios experimentais rolamentos com furos únicos de 2 e 4 mm de diâmetro nos anéis externo e interno, bem como um rolamento com estriamento generalizado em ambos os anéis. Alguns exemplos dos rolamentos utilizados encontram-se ilustrados na Figura

4.1-2. De acordo com as indicações do fabricante do motor de indução trifásico, foram utilizados rolamentos 6206 no lado do ataque e 6205 no lado do ventilador, encontrando-se as respectivas dimensões especificadas na Tabela 4.1-1. De forma a aumentar o rigor dos resultados experimentais, a relação D_B/D_P foi obtida experimentalmente através das frequências características de funcionamento dos rolamentos observadas nos espectros, com base em (2.2) e (2.3).

Tabela 4.1-1 - Dimensões dos rolamentos

Dimensões	6205	6206
Diâmetro externo (mm)	52	62
Diâmetro interno (mm)	25	30
Número de esferas	9	9
D_B/D_P	0.197459	0.198448

Os sinais de vibração do motor foram obtidos através de um acelerómetro triaxial da Vibrasens com sensibilidade de 1000 mV/g e resposta para a gama de frequências até 3700 Hz. O acelerómetro triaxial permite captar sinais em três direções, tendo como referência a sua posição na carcaça do motor - direção tangencial (eixo x), direção axial (eixo y), e direção radial (eixo z). A fixação do acelerómetro foi feita através de um parafuso, de modo a garantir um contacto firme e estável com a carcaça do motor, possibilitando a aquisição de sinal a altas frequências com menor risco de perturbações associadas a um contacto deficiente.

Os valores das correntes e tensões de alimentação foram adquiridos no cabo de alimentação do motor por intermédio de sensores de efeito Hall presentes na caixa de medições. Devem ser consideradas as razões de transformação da caixa de medições, sendo que para a corrente existe um ganho de 3:1 e para a tensão um ganho de 65:1. Foram adquiridas tensões e correntes das três fases de alimentação.

A aquisição das tensões induzidas foi efetuada através da instalação de 6 bobinas de prova no estator do motor de acordo com a Figura 3.4-1, com duas espiras cada uma, de forma a garantir tensões compatíveis com cRIO-9074 sem necessidade de transformadores externos. Destas bobinas resultam 6 tensões induzidas, duas por fase, posteriormente processadas de modo a obter as 3 tensões induzidas diferenciais em estudo.

Os sinais são transmitidos para o NI cRIO-9074, uma plataforma da National Instruments que combina uma FPGA com um sistema de controlo em tempo real. Para a aquisição dos sinais foram utilizados 4 módulos NI 9215, com 4 terminais BNC cada, que permitem a aquisição de

sinais analógicos. Nesse sentido, foram adquiridos sinais de vibração da carcaça do motor na direção dos três eixos, provenientes do acondicionador de sinal, os sinais elétricos das 3 tensões simples e de 3 correntes de alimentação do motor provenientes da caixa de medições bem como as 6 tensões induzidas nas bobinas de prova. A Figura 4.1-3 mostra a montagem experimental, onde se incluem os elementos acima caracterizados.

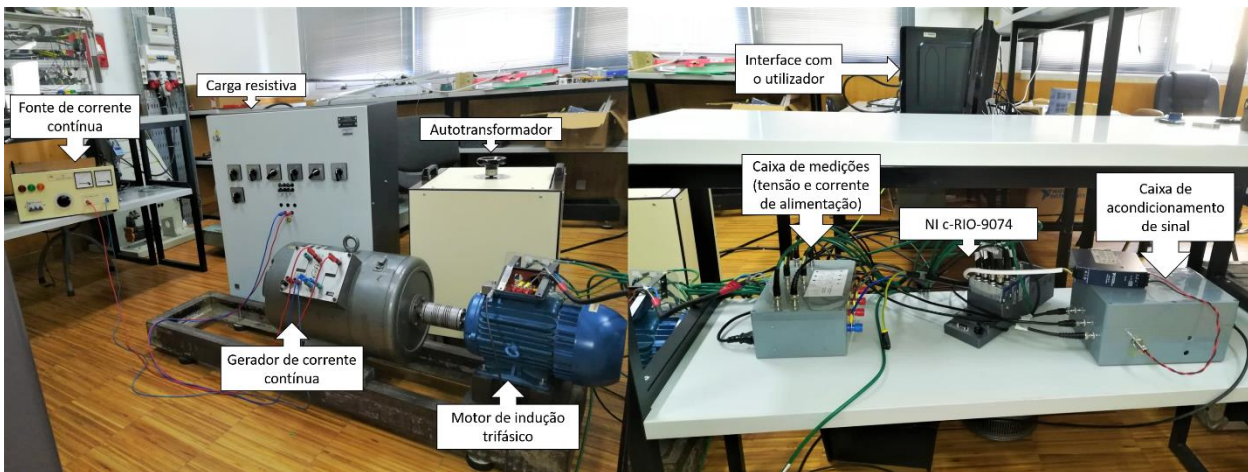


Figura 4.1-3 - Montagem experimental.

A interface com o utilizador é feito através do software LabVIEW, ferramenta da National Instruments que permite, entre outras funcionalidades, o processamento de sinais através de um programa desenvolvido pelo utilizador. Em ambiente LabVIEW foi desenvolvido um ficheiro .vi que permite a definição da frequência de amostragem e o número de amostras para cada processo de aquisição de sinais. Neste processo, foi efetuada uma aquisição simultânea de sinais de vibração da carcaça do motor, de sinais elétricos de alimentação e tensões das bobinas de prova, ou seja, 3 tensões simples de alimentação, 3 correntes de alimentação do motor e 6 tensões induzidas nas bobinas, a uma frequência de amostragem de 20 kHz. Em cada ensaio foram recolhidas 120000 amostras, o que perfaz um tempo de aquisição total de 6 segundos. Assim, a resolução espectral que se obtém dos sinais adquiridos é de aproximadamente 0.166 Hz.

De forma a eliminar a influência de excentricidades e assimetrias do motor, devido à sua construção não ideal, no método de diagnóstico baseado nas tensões induzidas diferenciais, as tensões foram normalizadas, usando para o efeito os dados obtidos com o motor boas condições. Para tal, a cada tensão induzida das 6 recolhidas para o funcionamento saudável do motor foi retirado o seu valor médio. De seguida as tensões foram passadas por filtros passa-banda de 4ª ordem com frequências de corte inferior de 40 Hz e corte superior de 60 Hz, para serem isoladas as suas componentes fundamentais. Após a filtragem, os valores obtidos foram comparados e obtido o valor mais elevado das componentes fundamentais. Por fim, todos os sinais foram multiplicados por uma constante K de forma a igualar as amplitudes das componentes

fundamentais das 6 tensões induzidas. Estes valores dos K foram mantidos constantes para cada avaria estudada e iguais aos valores obtidos para o motor saudável com vista a eliminar qualquer variável externa às avarias.

Para efetuar a análise espectral dos sinais adquiridos, é necessário determinar as frequências características dos anéis externo e interno dos rolamentos utilizados. Estas frequências características dependem do regime de carga do motor. Para o motor utilizado foram realizados ensaios quando este se encontrava a funcionar em vazio (acoplado ao gerador), a carga intermédia e a carga elevada. Na Tabela 4.1-2 são identificadas a velocidade e a frequência mecânica de rotação do rotor aos regimes de carga aplicados ao motor.

Tabela 4.1-2 - Velocidade e frequência mecânica para diferentes regimes de carga do motor ensaiado.

Regime de Carga	Velocidade (rpm)	Frequência Mecânica do Rotor (Hz)
Vazio	1498	24.967
Carga Intermédia	1480	24.666
Carga Elevada	1460	24.333

As frequências características dos rolamentos utilizados para cada regime de carga são determinadas através de (2.2) e (2.3), estando indicadas nas Tabela 4.1-3 e Tabela 4.1-4.

Tabela 4.1-3 - Frequências características do rolamento 6205 para diferentes regimes de carga.

Regime de Carga	Anel Interno (Hz)	Anel Externo (Hz)
Vazio	134.536	90.166
Carga Intermédia	132.914	89.080
Carga Elevada	131.120	87.824

Tabela 4.1-4 - Frequências características do rolamento 6206 para diferentes regimes de carga.

Regime de Carga	Anel Interno (Hz)	Anel Externo (Hz)
Vazio	134.647	90.056
Carga Intermédia	133.024	88.970
Carga Elevada	131.228	87.769

4.2. Resultados Obtidos

A montagem laboratorial descrita no ponto anterior teve como objetivo a utilização de vários rolamentos com diferentes avarias, de forma a simular diferentes tipos de avarias comuns em rolamentos de motores elétricos.

Na Tabela 4.2-1 estão descritas as diferentes avarias testadas durante o procedimento experimental.

Tabela 4.2-1 - Caracterização e numeração das avarias analisadas.

Caso	Tipo de avaria
1	1 furo 4 mm no anel externo, lado do ventilador
2	1 furo 2 mm no anel externo, lado do ventilador
3	1 furo 4 mm no anel interno, lado do ventilador
4	1 furo 2 mm no anel interno, lado do ventilador
5	Avaria generalizada (estriamento) anel interno e externo, lado do ataque
A	Avaria generalizada (estriamento) anel interno e externo, lado do ataque, alimentado por conversor de frequência

Para cada caso descrito na tabela anterior foram realizados ensaios em vazio, carga intermédia e carga elevada. Apenas serão apresentados os resultados para os ensaios em vazio e a carga elevada. Os resultados dos ensaios para carga intermédia podem ser consultados em anexo. Para cada avaria foram testados diferentes métodos de deteção de avarias em rolamentos, nomeadamente análise das vibrações da carcaça do motor e corrente com o objetivo de comparar os resultados obtidos através estes métodos de diagnóstico com os resultados obtidos através do método de diagnóstico proposto.

4.2.1. Avaria Singular de 4 mm no Anel Externo

Esta situação tem como objetivo simular um avaria severo no anel externo do rolamento do lado do ventilador, como uma fissura ou lascamento de dimensões consideráveis, através da utilização de um rolamento com um furo de 4 mm no anel externo. As componentes espectrais características deste tipo de avaria para as tensões diferenciais são obtidas através de (2.9) utilizando os dados referidos na Tabela 4.1-1 e Tabela 4.1-3. Para o cálculo das frequências de vibração foi utilizada a equação (2.7).

Funcionamento do Motor em Vazio

A primeira condição analisada, para uma avaria singular de 4 mm no anel externo, foi o motor de indução a funcionar em vazio e acoplado ao gerador de corrente contínua sem qualquer carga.

Na Figura 4.2-1 são apresentadas as tensões induzidas nas bobinas SU12 e SU34 para a avaria singular de 4 mm no anel externo do rolamento do lado do ventilador.

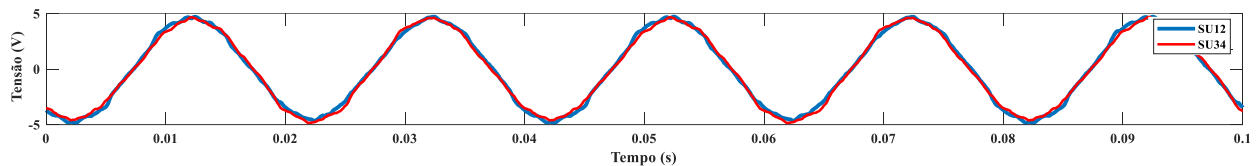


Figura 4.2-1 - Tensões induzidas nas espiras SU12 e SU34 para o motor em vazio com uma avaria de 4 mm no anel externo do rolamento do lado do ventilador.

Através das tensões induzidas nas bobinas SU12 e SU34 é obtida a tensão induzida diferencial referente à Fase U, de acordo com (3.8). Na Figura 4.2-2 encontra-se representada a tensão induzida diferencial referente à Fase U no domínio do tempo.

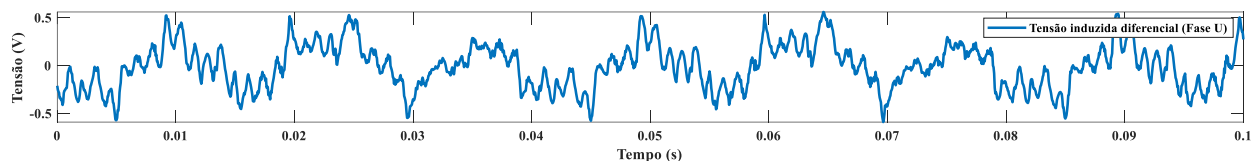


Figura 4.2-2 - Tensão induzida diferencial da fase U no domínio do tempo para o motor em vazio e com uma avaria de 4 mm no anel externo do rolamento do lado do ventilador.

Através do sinal no domínio do tempo da tensão induzida diferencial é obtida a sua FFT, necessária para a análise espectral do sinal, passo necessário para o diagnóstico da avaria. Na Figura 4.2-3 é apresentado o espectro do sinal obtido.

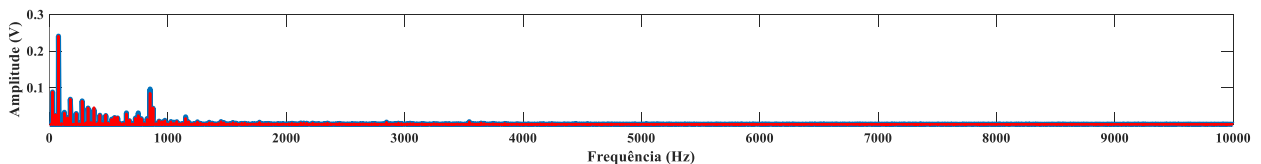


Figura 4.2-3 - Espectro da tensão induzida diferencial da fase U para o motor a funcionar em vazio com uma avaria de 4 mm no anel externo do rolamento do lado do ventilador.

Na Figura 4.2-4 são apresentados os espectros das tensões induzidas diferenciais em cada uma das fases para a avaria singular de 4 mm no anel externo do rolamento do lado do ventilador

e para a situação de funcionamento saudável do motor. São apresentados os espectros de tensões induzidas diferenciais até aos 700 Hz, uma vez que as componentes espectrais das tensões induzidas diferenciais visíveis nos espectros são suficientes para o diagnóstico da avaria, facilitando assim a leitura e interpretação dos dados apresentados. Neste estudo são apenas consideradas componentes espectrais com amplitude superior a 1 mV e inequivocamente distintas das componentes vizinhas, de forma a eliminar possíveis perturbações por ruído da análise da avaria.

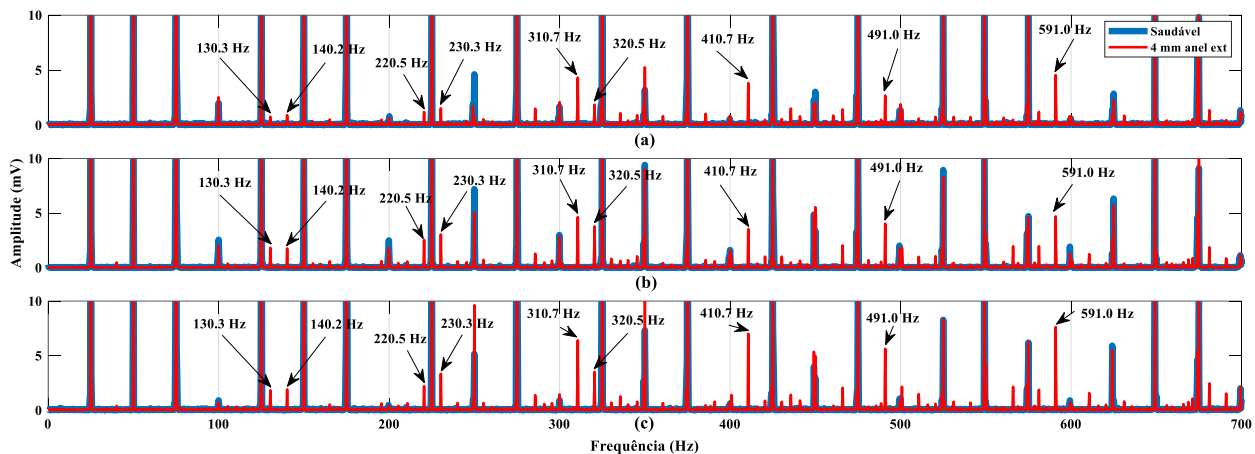


Figura 4.2-4 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel externo, no rolamento do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Como se pode observar na figura anterior, quando o motor se encontra a funcionar em vazio com a avaria de 4 mm no anel externo regista-se o aparecimento de novas componentes espectrais não presentes com rolamentos saudáveis, com especial significado para as frequências 220.50 Hz ($k=3$), 230.333 Hz ($k=2$), 310.666 Hz ($k=4$), 320.500 Hz ($k=3$), 410.666 Hz ($k=4$), 491.000 Hz ($k=6$) e 591.000 Hz ($k=6$). Estas frequências são coincidentes com as frequências características de avaria esperadas para corrente, verificando-se assim a relação teórica entre os harmónicos das tensões induzidas diferenciais e da corrente.

Na Figura 4.2-5 encontram-se os espectros da corrente de alimentação I_R e vibração segundo direção radial para uma avaria de 4 mm no anel externo e para o motor saudável, com o motor em vazio.

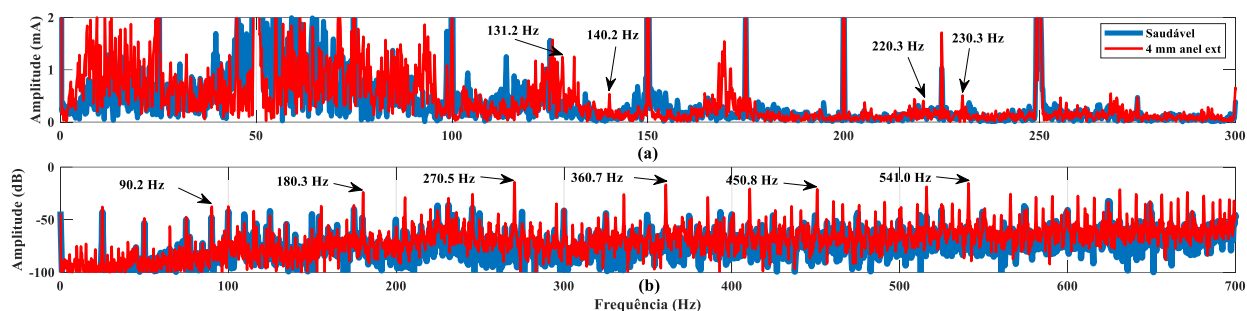


Figura 4.2-5 - Espectros da corrente e vibração para o funcionamento do motor em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

Pela figura anterior verifica-se que as frequências características de avaria para o método das tensões induzidas diferenciais correspondem às frequências características de avaria no sinal da corrente de alimentação, obtidas através de (2.9), nomeadamente as frequências 220.333 Hz ($k=3$) e 230.333 Hz ($k=2$). Além destas frequências, foi possível observar no espectro das correntes de alimentação um aumento significativo da amplitude das componentes espectrais às frequências 131.166 Hz ($k=2$) e 140.166 Hz ($k=1$). No entanto, observa-se uma marcada perda de componentes da corrente em frequências mais elevadas devido ao aumento da impedância interna do motor com o aumento da frequência. Este facto leva a uma marcada perda de informação acima dos 300 Hz, onde quer nos espectros das tensões induzidas diferenciais quer no espectro das vibrações da carcaça do motor existem mais componentes de frequência associados à avaria.

No espectro das vibrações da carcaça do motor, com frequências características obtidas através de (2.2) e (2.7), é possível identificar com facilidade as frequências características de avaria, com especial relevância para as componentes espectrais 180.333 Hz ($k=2$) 270.50 Hz ($k=3$), 360.666 Hz ($k=4$), 450.833 Hz ($k=5$) e 541.000 Hz ($k=6$), frequências coincidentes com as frequências teóricas calculadas através de (2.7).

Na Tabela 4.2-2 e Tabela 4.2-3 é, por fim, feita uma comparação numérica entre os diferentes métodos de diagnóstico de avarias testados, recorrendo a uma comparação logarítmica das amplitudes dos sinais para as componentes de frequência de interesse para o estudo da avaria. Deste modo, pretende-se avaliar a sensibilidade do método das tensões induzidas diferenciais em relação aos métodos baseados na análise da corrente de alimentação e da vibração da carcaça do motor. Para estas tabelas foram apenas utilizadas componentes de tensão induzida diferencial com amplitude superior a 1 mV e inequivocamente distintas das componentes vizinhas. Para a análise em dB foram apenas consideradas componentes cuja diferença de amplitudes entre saudável e avaria fosse superior a 5 dB. Entre 5 dB e 9.9 dB foi

utilizada a cor amarela para identificar as componentes e a partir de 10 dB a cor verde. Esta lógica foi utilizada para todas as tabelas de comparação de amplitudes presentes ao longo deste documento.

Apesar de em cada uma das tabelas ser apenas comparada a tensão induzida diferencial relativa à fase U, por facilidade de leitura e questões práticas, as tensões induzidas diferenciais deverão ser sempre avaliadas no seu conjunto das três fases, uma vez que existem diferenças de amplitude para cada componente e, nalguns casos, o aparecimento ou desaparecimento de componentes de frequências de avaria relevantes. Através destas diferenças entre fases das tensões induzidas diferenciais observa-se uma possível sensibilidade deste método de diagnóstico à localização da avaria no anel externo do rolamento.

Tabela 4.2-2 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em vazio com avaria de 4 mm no anel externo.

<i>k</i>	Freq. Teórica (Hz)	Tensões induzidas diferenciais (Fase U)				Corrente de alimentação (Fase R)			
		Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
1	40.166								
	140.166	140.166	-78.5	-60.8	17.7	140.166	-82.1	-65.5	16.6
2	130.332	130.333	-82.0	-62.3	19.7	131.166	-75.2	-58.0	17.2
	230.332	230.333	-83.0	-56.5	26.5	230.333	-73.7	-65.9	7.8
3	220.498	220.500	-83.5	-58.3	25.2	220.333	-79.4	-67.8	11.6
	320.498	320.500	-86.5	-54.6	31.9				
4	310.664	310.666	-81.0	-47.3	33.7				
	410.664	410.666	-103.0	-48.3	54.7				
5	400.833								
	500.833	500.833	-74.3	-57.4	16.9				
6	490.996	491.000	-107.0	-51.4	55.6				
	590.996	591.000	-74.5	-46.8	27.7				

Tabela 4.2-3 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para o método de diagnóstico baseado nas vibrações da carcaça do motor para o ensaio em vazio com avaria de 4 mm no anel externo.

Vibrações da carcaça do motor (Direção radial)					
k	Freq. Teórica (Hz)	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
1	90.166	90.166	-47.7	-37.6	10.1
2	180.332	180.333	-48.1	-23.9	24.2
3	270.498	270.500	-58.1	-14.3	43.8
4	360.664	360.666	-63.7	-16.7	47.0
5	450.833	450.833	-46.0	-21.1	24.9
6	540.996	541.000	-68.5	-15.4	53.1

Como é observável nas tabelas anteriores, numa situação de funcionamento em vazio para a avaria em estudo o método das tensões induzidas diferenciais revela não só um maior número de componentes espectrais do que o método das correntes de alimentação como também exibe uma muito maior sensibilidade à avaria, uma vez que existem variações muito mais alargadas da amplitude de cada componente espectral. O método das tensões induzidas diferenciais tem, para este caso, uma sensibilidade à avaria semelhante ao método baseado nas vibrações da carcaça do motor, com variações de amplitude em dB comparáveis nos dois métodos para cada componente espectral característica da avaria em estudo.

Funcionamento do Motor com Carga Elevada

Nesta situação foram repetidos os ensaios anteriores, agora com o motor de indução trifásico com carga elevada.

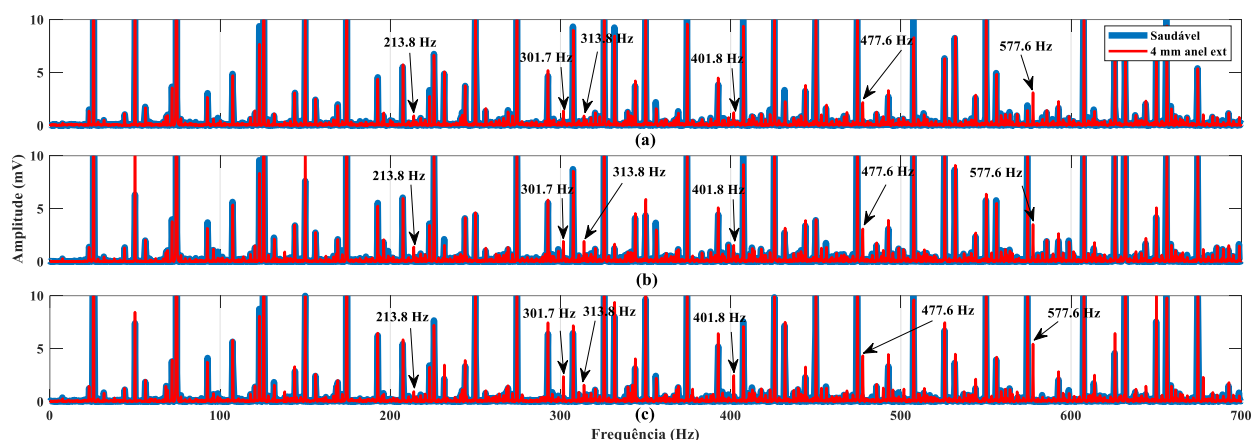


Figura 4.2-6 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Na Figura 4.2-6 estão representados os espectros das tensões induzidas diferenciais para esta nova situação de carga. Nesta situação, são identificáveis as componentes espectrais 213.833 Hz ($k=3$), 301.666 Hz ($k=4$), 313.833 Hz ($k=3$), 401.833 Hz ($k=4$), 477.666 Hz ($k=6$) e 577.666 Hz ($k=6$). Estas componentes espectrais têm o seu paralelo nas principais componentes espectrais observadas nos ensaios em vazio descritos anteriormente, havendo, no entanto, uma variação das frequências obtidas devido ao maior deslizamento do rotor para a carga elevada, o que se traduz numa redução da frequência de rotação do rotor.

Na Figura 4.2-7 encontram-se os espectros da corrente de alimentação da fase R e das vibrações da carcaça do motor para o motor em boas condições de funcionamento e com uma avaria de 4 mm no anel externo do rolamento do lado do ventilador.

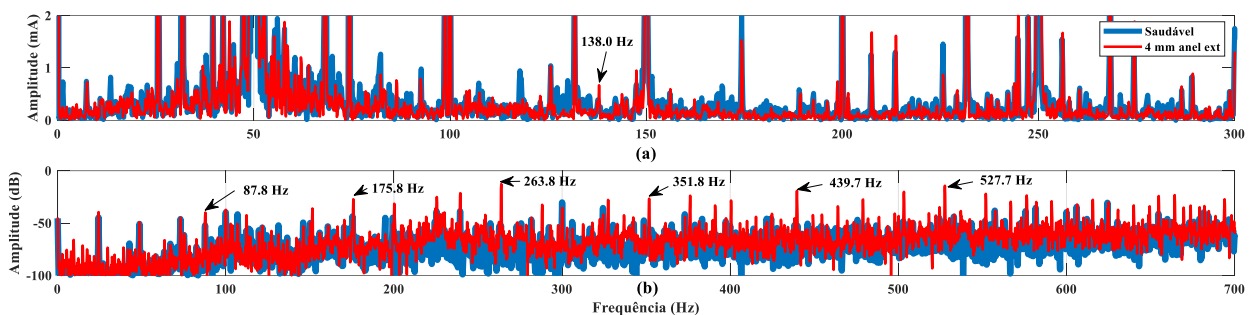


Figura 4.2-7 - Espectros da corrente e vibrações da carcaça para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

Através da figura conclui-se que é praticamente impossível o diagnóstico da avaria através do método da análise das correntes de alimentação do motor, devido à ausência de componentes espectrais com frequências características de avaria no anel externo, sendo apenas identificável a componente espectral à frequência 138.000 Hz ($k=1$). Por outro lado, observa-se a presença de frequências características nas vibrações da carcaça do motor, especialmente às frequências 263.833 Hz ($k=3$), 351.833 Hz ($k=4$), 439.666 Hz ($k=5$) e 527.666 Hz ($k=6$). Uma vez mais é possível verificar um paralelismo entre as componentes espectrais dos espectros de vibração e de tensões induzidas diferenciais para a avaria de 4 mm no anel externo do rolamento.

Na Tabela 4.2-4 e

Tabela 4.2-5 são comparadas as diferenças de amplitude, em dB, para as três técnicas de diagnóstico em análise, de forma a comparar a sua sensibilidade para uma situação de carga elevada.

Tabela 4.2-4 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio com carga elevada e com uma avaria de 4 mm no anel externo.

<i>k</i>	Freq. Teórica (Hz)	Tensões induzidas diferenciais (Fase U)				Corrente de alimentação (Fase R)			
		Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
1	37.824								
	137.824					138.000	-75.2	-63.5	11.7
2	125.648								
	225.648								
3	213.472	213.833	-72.2	-60.5	11.7				
	313.472	313.833	-65.7	-60.6	5.1				
4	301.296	301.666	-66.3	-57.0	9.3				
	401.296	401.833	-69.1	-58.1	11.0				
5	389.120								
	489.120								
6	476.944	477.666	-68.8	-53.0	15.8				
	576.944	577.666	-75.5	-50.0	25.5				

Tabela 4.2-5 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para o método de diagnóstico baseado nas vibrações da carcaça do motor para o ensaio com carga elevada e com uma avaria de 4 mm no anel externo.

Vibrações da carcaça do motor (Direção radial)					
<i>k</i>	Freq. Teórica (Hz)	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
1	87.824	87.833	-52.1	-39.9	12.2
2	175.648	175.833	-43.6	-27.1	16.5
3	263.472	263.833	-52.3	-12.7	39.6
4	351.296	351.833	-56.9	-26.6	30.3
5	439.120	439.666	-62.7	-19.2	43.5
6	526.944	527.666	-49.4	-14.3	35.1

Nas tabelas anteriores observa-se a variação das amplitudes em dB para cada componente observável nos espectros obtidos através de cada método. Com o aumento do nível de carga do motor verificou-se uma redução geral da variação da amplitude de cada componente espectral, bem como uma redução do número de componentes espectrais identificáveis nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação. Esta redução de amplitude das

componentes espectrais analisadas é provocada pelo amortecimento das vibrações da carcaça pela carga mecânica do motor, fenômeno identificado em [6], onde é abordada a influência do nível de carga do motor no nível de vibração produzida por um rolamento com avaria.

Apesar deste fenômeno de atenuação das componentes espectrais é ainda possível identificar a ocorrência da avaria através da vibração e das tensões induzidas diferenciais.

4.2.2. Avaria Singular de 2 mm no Anel Externo

Este ensaio tem como objetivo averiguar a sensibilidade do método das tensões induzidas diferenciais à severidade da avaria do rolamento no anel externo. Assim, foi utilizado um rolamento no lado do ventilador (6205) com um furo no anel externo de 2 mm que simula uma avaria semelhante ao do ponto anterior mas com um menor nível de severidade da avaria. Tal como para a situação anterior, as componentes espectrais características deste tipo de avaria para as tensões diferenciais foram obtidas através de (2.2) e (2.9) para as tensões induzidas diferenciais e correntes utilizando os dados referidos na Tabela 4.1-1 a Tabela 4.1-3. Para o cálculo das frequências de vibração foi utilizada (2.7).

Funcionamento do Motor em Vazio

Na Figura 4.2-8 são apresentadas as tensões induzidas diferenciais para cada uma das fases, para o motor em vazio.

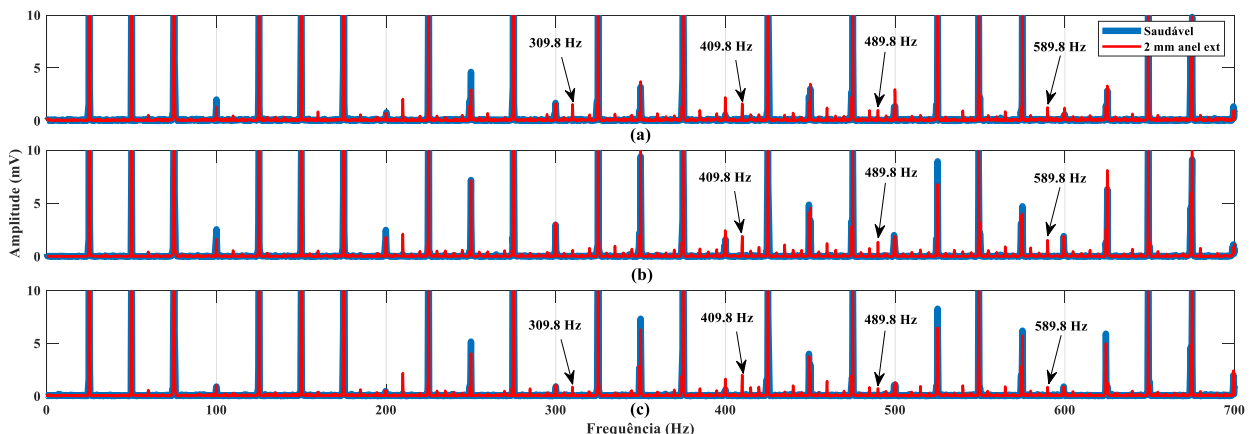


Figura 4.2-8 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Para a situação de funcionamento do motor de indução trifásico em vazio verifica-se o aparecimento de algumas componentes espectrais nas tensões induzidas diferenciais na situação de avaria, sendo as mais significativas as componentes às frequências 309.833 Hz ($k=4$), 409.833 Hz ($k=4$), 489.833 Hz ($k=6$) e 589.833 Hz ($k=6$). Em comparação com a avaria do caso anterior,

de 4 mm, regista-se uma significativa diminuição quer do número de componentes com frequências associadas à avaria quer da amplitude das componentes existentes.

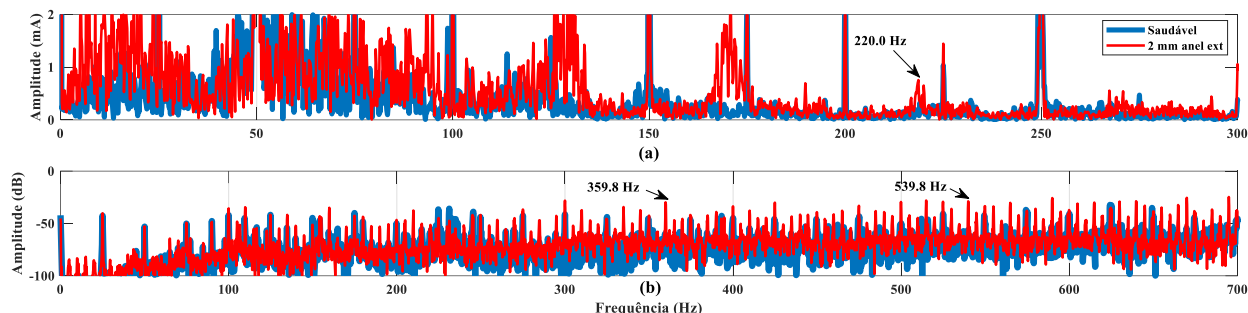


Figura 4.2-9 - Espectros das correntes e vibrações da carcaça para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

Com uma avaria de 2 mm no anel externo do rolamento, o diagnóstico através do método da análise das correntes de alimentação revelou-se pouco eficaz, devido à ausência de componentes espectrais significativas que permitam o correto diagnóstico da avaria. No entanto, foi possível identificar a componente de 220.000 Hz associada à avaria ($k=3$). É ainda visível um aumento generalizado da amplitude da corrente na região dos 130 Hz, sem, contudo, ser possível identificar uma componente de frequência específica associada à avaria.

Na análise das vibrações da carcaça registou-se um aumento generalizado da amplitude do sinal, sendo, no entanto, possível identificar as componentes às frequências 359.833 Hz ($k=4$) e 539.833 Hz ($k=6$), uma vez mais as componentes espectrais análogas às componentes mais relevantes dos espectros das tensões induzidas diferenciais.

Tabela 4.2-6 - Variação da amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em vazio com uma avaria de 2 mm no anel externo.

<i>k</i>	Freq. Teórica (Hz)	Tensões induzidas diferenciais (Fase U)				Corrente de alimentação (Fase R)			
		Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
1	40.166								
	140.166								
2	130.332								
	230.332								
3	220.498					220.000	-74.0	-63.7	10.3
	320.498								
4	310.664	309.833	-77.1	-56.0	21.1				
	410.664	409.833	-77.1	-55.7	21.4				
5	400.833								
	500.833								
6	490.996	489.833	-75.0	-59.8	15.2				
	590.996	589.833	-84.6	-57.8	26.8				

Tabela 4.2-7 - Variação da amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para o método de diagnóstico baseado nas vibrações da carcaça do motor para o ensaio em vazio com uma avaria de 2 mm no anel externo.

<i>k</i>	Freq. Teórica (Hz)	Vibrações da carcaça do motor (Direção radial)			
		Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
1	90.166				
2	180.332				
3	270.498				
4	360.664	359.833	-62.7	-29.8	32.9
5	450.833				
6	540.996	539.833	-56.5	-28.9	27.6

Como verificável nas tabelas anteriores, existe uma atenuação significativa das amplitudes das componentes características da avaria no anel externo. Assim, é possível demonstrar a sensibilidade do método das tensões induzidas diferenciais à severidade da avaria, que corresponde à atenuação das vibrações mecânicas do rolamento.

Funcionamento do Motor com Carga Elevada

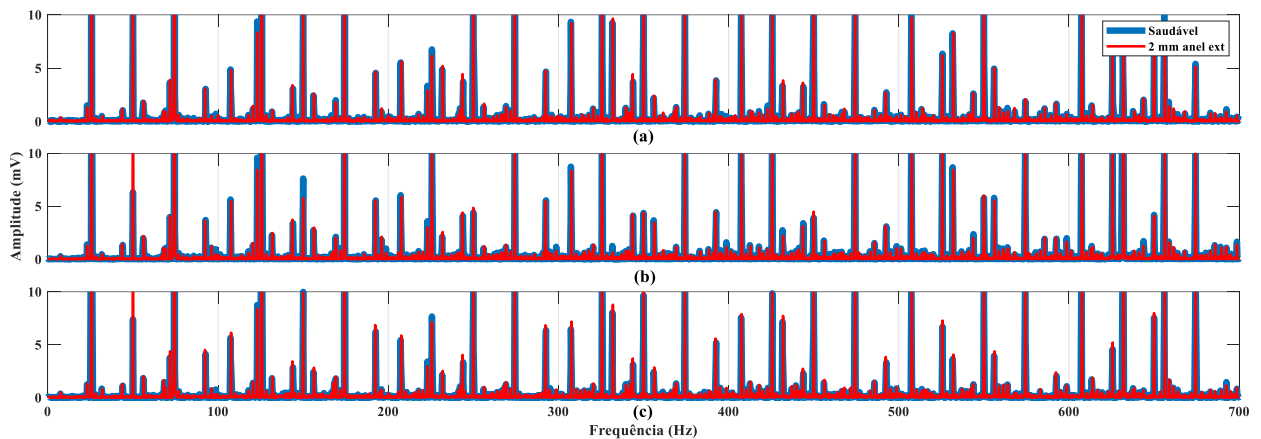


Figura 4.2-10 - Espectros representativos das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Para a mesma avaria com o motor de indução trifásico a funcionar com carga elevada, ilustrada na Figura 4.2-10 e Figura 4.2-11, revela-se difícil o diagnóstico da avaria através do método das tensões induzidas diferenciais, uma vez que a assinatura espectral referente não sofre alterações assinaláveis quer nas amplitudes quer nas componentes de frequência em relação ao funcionamento saudável do motor.

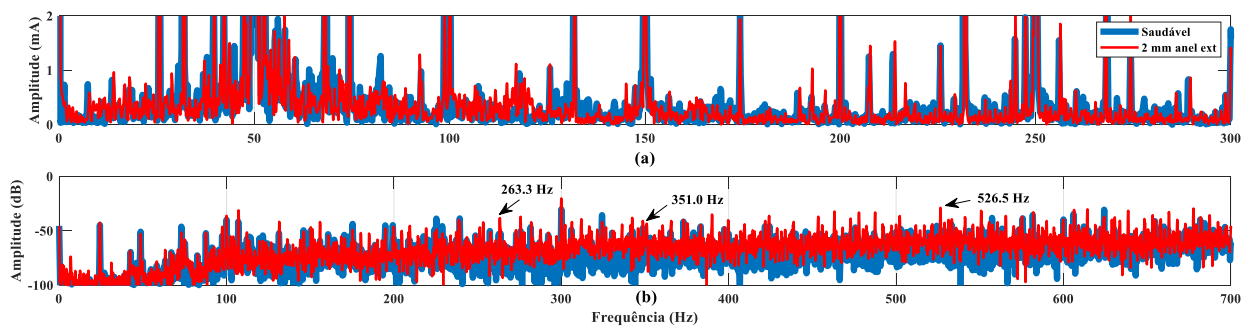


Figura 4.2-11 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

Do mesmo modo, também não foi possível o diagnóstico da avaria através das correntes de alimentação, também estas praticamente inalteradas pela avaria em estudo.

No espectro das vibrações é possível registar um ligeiro aumento da amplitude das componentes às frequências 263.333 Hz ($k=3$), 351.000 Hz ($k=4$) e 526.500 Hz ($k=6$).

Devido à atenuação das componentes de frequência de detecção da avaria para cargas elevadas referida em [6], não foi possível, para a situação de carga elevada com uma avaria de 2 mm no anel externo, diagnosticar a avaria quer através do método das tensões induzidas diferenciais quer através do método das correntes de alimentação. Também nas vibrações mecânicas da carcaça do motor se verificou uma elevada atenuação das componentes de frequência em análise.

4.2.3. Avaria Singular de 4 mm no Anel Interno

Esta situação tem como objetivo representar um avaria severo no anel interno do rolamento do lado do ventilador. Para tal, foi utilizado um rolamento 6205 com um furo de 4 mm no anel interno. As frequências características de avaria para o anel interno, relativamente às tensões diferenciais e correntes, são dadas por (2.3) e (2.10). As frequências características de vibração são dadas por (2.7). Para esta avaria, tal como para os casos anteriores, serão analisados os ensaios com o motor em vazio e carga elevada. Os dados referentes aos ensaios a carga intermédia encontram-se em anexo.

Funcionamento do Motor em Vazio

Na Figura 4.2-12 e Figura 4.2-13 são apresentados os espectros das tensões diferenciais, correntes e vibração para uma avaria singular de 4 mm no anel interno, para o motor em vazio.

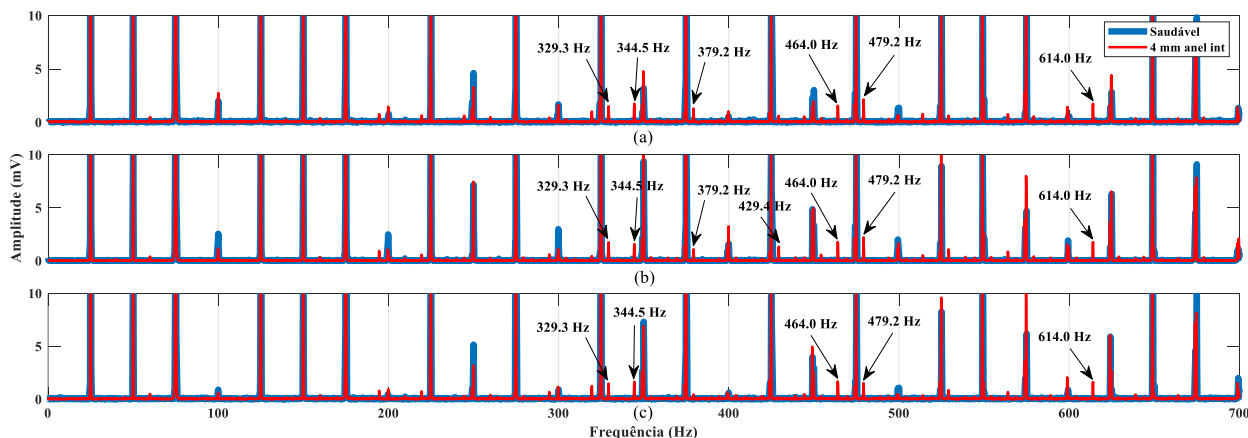


Figura 4.2-12 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Nesta situação surgiram nos espectros das tensões induzidas diferenciais diversas frequências associadas a uma avaria no anel interno do rolamento. São de destacar as componentes às frequências 329.333 Hz ($k=3$), 344.500 Hz ($k=2$), 379.166 Hz ($k=3$), 464.000 Hz ($k=4$), 479.166 Hz ($k=3$) e 614.000 Hz ($k=4$).

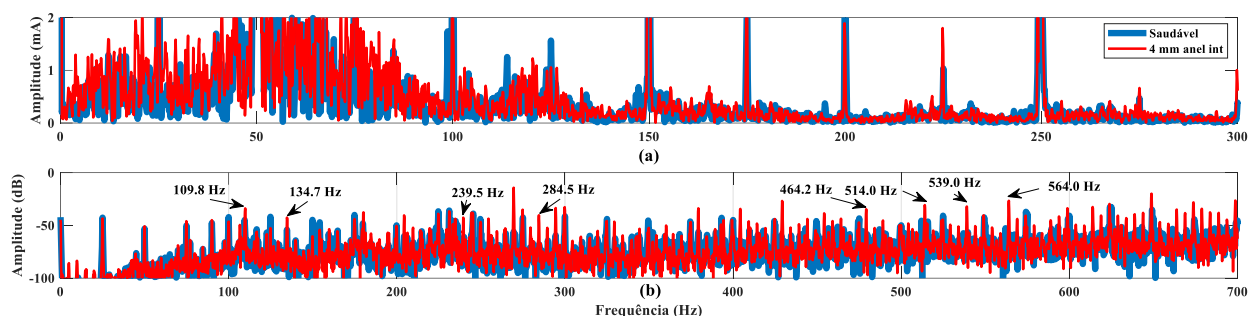


Figura 4.2-13 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

Na análise das correntes de alimentação não foi possível identificar componentes de frequência associadas à avaria em estudo, impedindo a deteção da mesma através deste método de diagnóstico. Nas vibrações as componentes mais significativas foram as componentes às frequências 109.833 Hz ($k=1$), 134.666 Hz ($k=0$), 239.500 Hz ($k=15$), 284.500 Hz ($k=6$), 464.166 Hz ($k=24$), 514.000 Hz ($k=26$), 539.000 Hz ($k=27$) e 564.000 Hz ($k=28$).

Tabela 4.2-8 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em vazio com avaria de 4 mm no anel interno.

k	Freq. Teórica (Hz)	Tensões induzidas diferenciais (Fase U)				Corrente de alimentação (Fase R)			
		Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
2	344.039	344.500	-71.8	-55.2	16.6				
	3	328.641	329.333	-87.5	-56.4	31.1			
	378.575	379.166	-87.4	-58.1	36.3				
	428.641								
	478.575	479.166	-84.0	-53.4	30.6				
4	463.167	464.000	-88.6	-56.1	32.5				
	513.111								
	563.177								
	613.111	614.000	-79.0	-55.2	23.8				

Tabela 4.2-9 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para o método de diagnóstico baseado nas vibrações da carcaça do motor para o ensaio em vazio com avaria de 4 mm no anel interno.

Vibrações da carcaça do motor (Direção radial)					
k	Freq. Teórica (Hz)	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
0	134.536	134.666	-54.1	-42.6	11.5
1	109.569	109.833	-47.5	-33.8	13.7
6	284.338	284.500	-68.4	-40.4	28.0
15	239.969	239.500	-79.9	-42.6	37.3
24	464.672	464.166	-55.8	-43.6	12.2
26	514.606	514.000	-80.4	-30.7	49.7
27	539.573	539.000	-74.2	-32.1	42.1
28	564.540	564.000	-58.5	-26.6	31.9

Pelos dados das tabelas anteriores conclui-se que, embora seja possível a deteção da avaria no anel interno através do método das tensões induzidas diferenciais, o diagnóstico desta avaria revela-se mais difícil que o diagnóstico da avaria de 4 mm no anel externo, devido ao menor número de componentes espectrais associados à avaria. Esta maior dificuldade de deteção da avaria reflete-se também no método de diagnóstico baseado nas correntes de alimentação, não tendo sido possível detetar a avaria através deste método. A dificuldade de deteção de avarias no anel interno de um rolamento foi referida em estudos anteriores [19], [34], [35].

Funcionamento do Motor com Carga Elevada

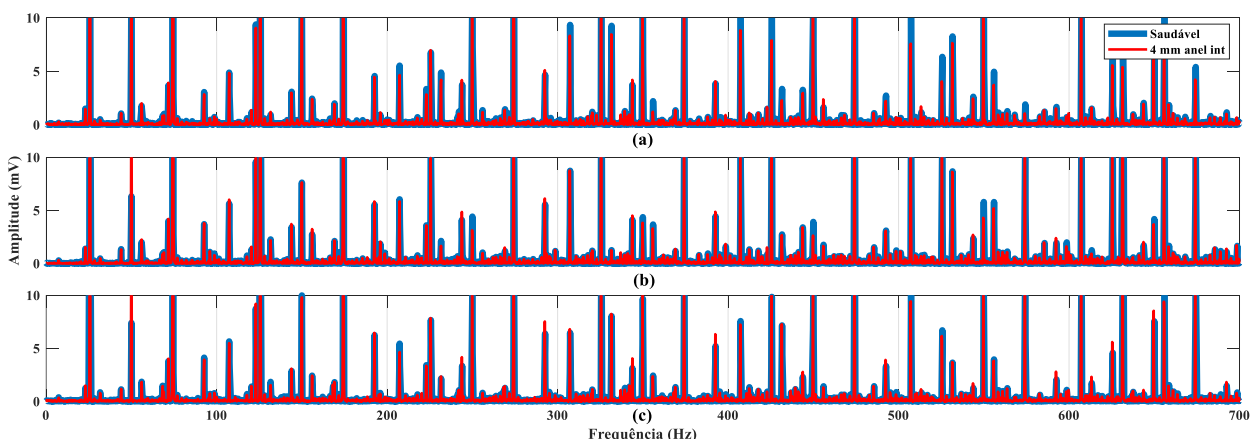


Figura 4.2-14 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Em situação de carga elevada (Figura 4.2-14) não foi possível identificar nos espectros das tensões induzidas diferenciais um aumento expressivo de qualquer componente de espectral, não sendo por isso possível diagnosticar a avaria através deste método.

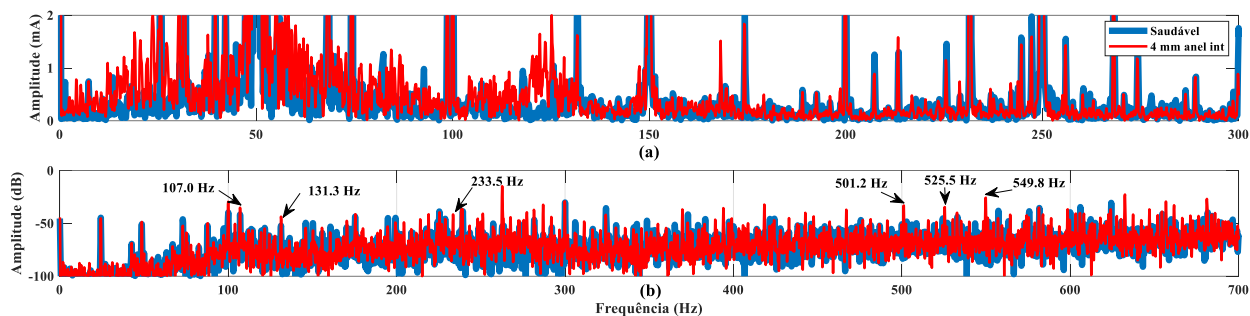


Figura 4.2-15 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

Tal como para as tensões induzidas diferenciais, também na corrente a ausência de componentes espectrais nas componentes de frequência de avaria torna impossível a deteção da avaria. Nos espectros das vibrações foi possível identificar um aumento relativamente significativo de amplitude nas componentes espectrais às frequências 107.000 Hz ($k=1$), 131.333 Hz ($k=0$), 233.500 Hz ($k=7$), 501.166 Hz ($k=26$), 525.500 Hz ($k=27$) e 549.833 Hz ($k=28$).

4.2.4. Avaria Singular de 2 mm no Anel Interno

De forma a averiguar a sensibilidade do método de diagnóstico baseado nas tensões induzidas diferenciais para uma avaria no anel interno, foram também realizados ensaios semelhantes aos do ponto anterior, desta vez com um rolamento com um furo de 2 mm no anel interno. Pretende-se assim simular uma avaria no anel interno pouco severo.

Funcionamento do Motor em Vazio

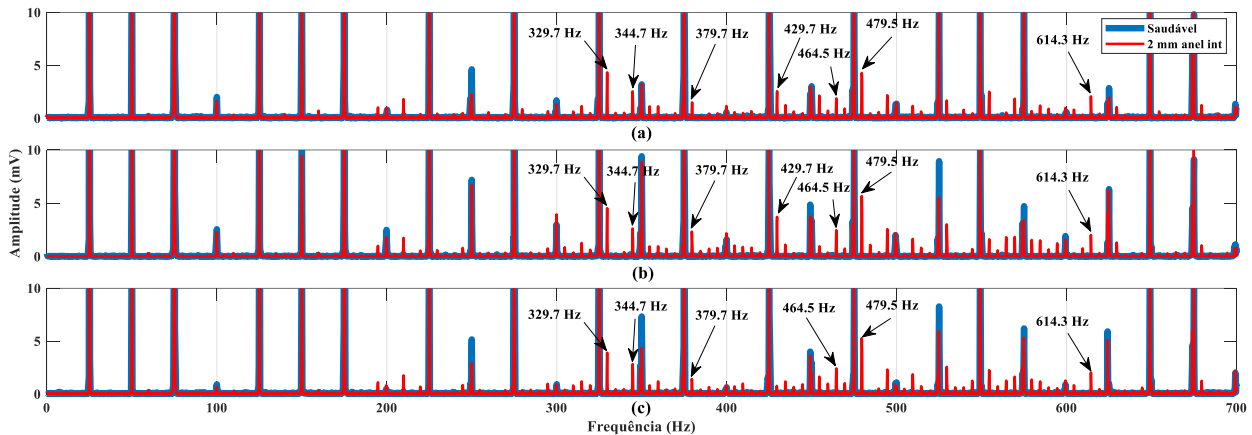


Figura 4.2-16 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Na Figura 4.2-16 observam-se os espectros das tensões induzidas diferenciais para cada uma das três fases. É de destacar o aumento das amplitudes das componentes às frequências 329.666 Hz ($k=3$), 344.666 Hz ($k=2$), 379.666 Hz ($k=3$), 429.666 Hz ($k=3$), 464.500 Hz ($k=4$), 479.500 Hz ($k=3$) e 614.333 Hz ($k=4$).

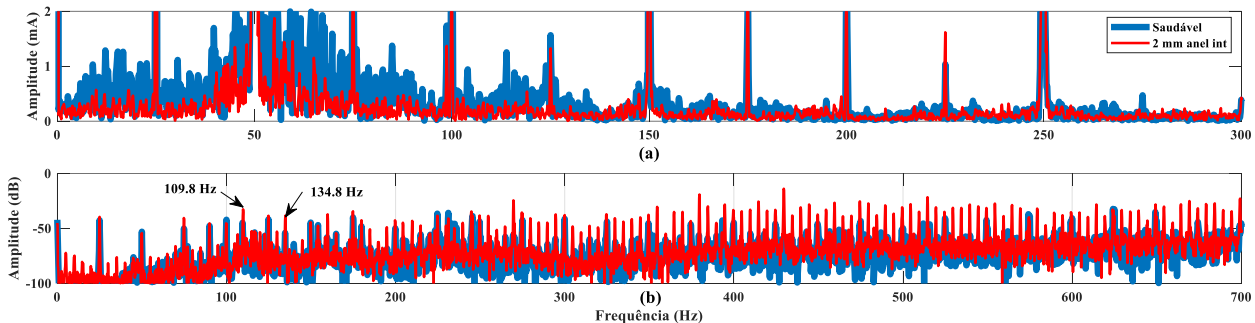


Figura 4.2-17 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

Nesta situação não foi possível observar uma alteração significativa do espectro de corrente, não sendo conclusivo para o diagnóstico da avaria. Nas vibrações existe um aumento generalizado da amplitude em toda a gama de frequências analisada, sendo apenas possível identificar com alguma clareza as componentes às frequências 109.833 Hz ($k=1$) e 134.833 Hz ($k=0$).

Tabela 4.2-10 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em vazio com avaria de 2 mm no anel interno.

<i>k</i>	Tensões induzidas diferenciais (Fase U)					Corrente de alimentação (Fase R)			
	Freq. Teórica (Hz)	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
2	344.039	344.666	-71.8	-52.3	19.5				
3	328.641	329.666	-82.7	-47.6	35.1				
	378.575	379.666	-87.4	-56.8	30.6				
	428.641	429.666	-80.4	-52.2	28.2				
	478.575	479.166	-83.1	-47.7	35.4				
4	463.167	464.500	-83.5	-54.9	28.6				
	513.111								
	563.177								
	613.111	614.333	-74.5	-54.0	20.5				

Tabela 4.2-11 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para o método de diagnóstico baseado nas vibrações da carcaça do motor para o ensaio em vazio com avaria de 2 mm no anel interno.

Vibrações da carcaça do motor (Direção radial)					
<i>k</i>	Freq. Teórica (Hz)	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
0	134.536	134.833	-54.1	-38.5	15.6
1	109.569	109.833	-44.9	-32.7	12.2

Em relação aos resultados obtidos no ensaio com avaria no anel interno de 4 mm, os espectros das tensões induzidas diferenciais não revelam alterações significativas. Assim, pode concluir-se que apesar de ser possível a deteção de uma avaria no anel interno de um rolamento num motor de indução trifásico através deste método, não existe, para esta avaria, sensibilidade à severidade da avaria.

Nas vibrações da carcaça do motor não houve, de igual forma, atenuação das componentes de frequência de avaria, mas a deteção da avaria revelou-se difícil devido ao aumento generalizado da amplitude do sinal e surgimento de inúmeras componentes de frequências não relacionadas com as frequências de avaria. Assim, foi apenas possível identificar inequivocamente duas componentes de frequência.

Funcionamento do Motor com Carga Elevada

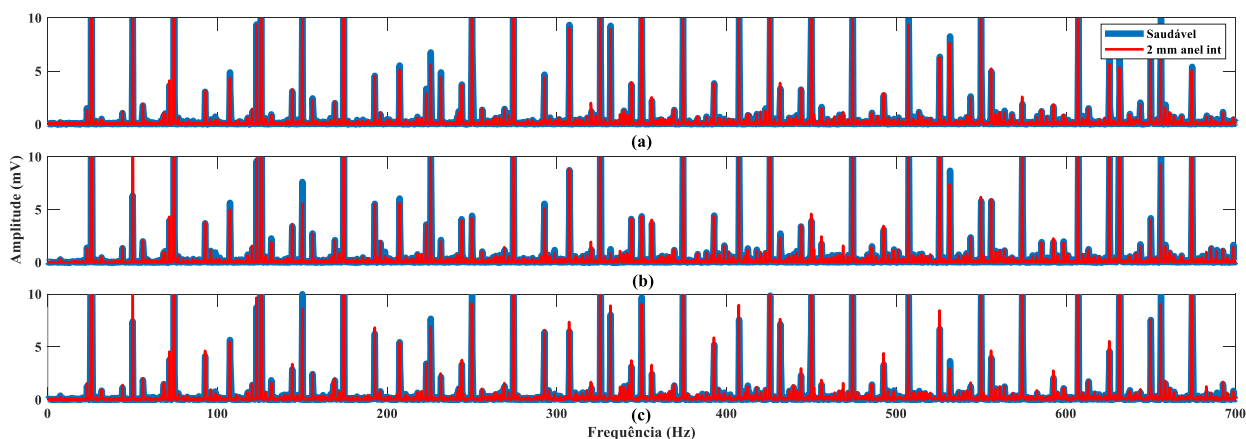


Figura 4.2-18 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Em situação de carga elevada não é possível diagnosticar a avaria devido à ausência de componentes de frequência relacionadas com a avaria no espectro das tensões induzidas diferenciais.

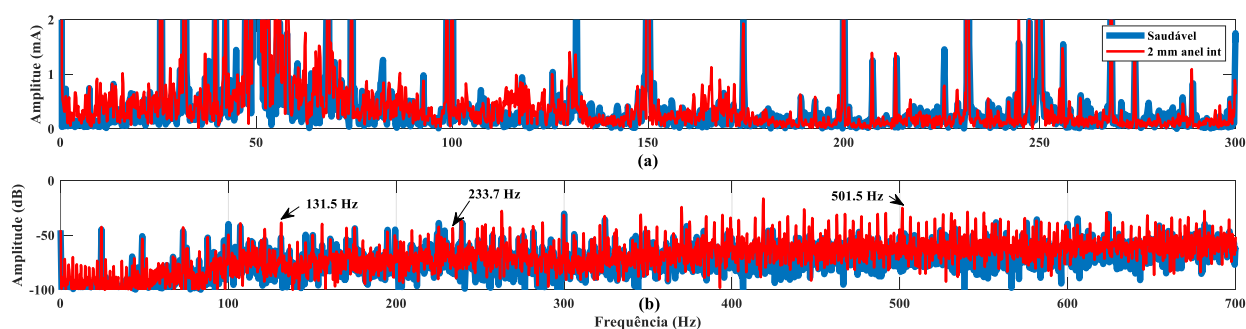


Figura 4.2-19 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

De igual modo, nas correntes não são identificáveis diferenças nas componentes espectrais em análise. Nas vibrações existe um ligeiro aumento das componentes às frequências 131.500 Hz ($k=0$), 233.666 Hz ($k=7$) e 501.500 Hz ($k=26$).

4.2.5. Avaria Generalizada no Anel Externo e Interno

A avaria generalizada no anel externo e interno é uma avaria de cariz diferente das avarias analisadas anteriormente. Para este ensaio não foi utilizado um rolamento furado nos anéis

externo e interno para simular um avaria generalizado, como nos casos anteriores. Foi utilizado um rolamento 6206 (lado da carga) que foi sujeito à passagem de uma corrente de 12 A durante 50 horas, de modo a provocar um estriamento generalizado no rolamento. Desse procedimento resultou um rolamento estriado no anel externo e interno, semelhante ao desgaste que um rolamento teria em ambiente industrial quando atravessado por correntes elevadas [35].

A análise das frequências para avarias generalizados é complexa e a determinação das frequências características de avaria difícil. No entanto, durante a análise dos espectros relativos às tensões induzidas diferenciais para esta avaria, observou-se uma sobreposição das frequências de avaria típicas para uma avaria singular no anel externo com as frequências de avaria típicas para uma avaria singular no anel interno. Assim sendo, as frequências de avaria para esta avaria são dadas por (2.2), (2.3), (2.9) e (2.10).

Funcionamento do Motor em Vazio

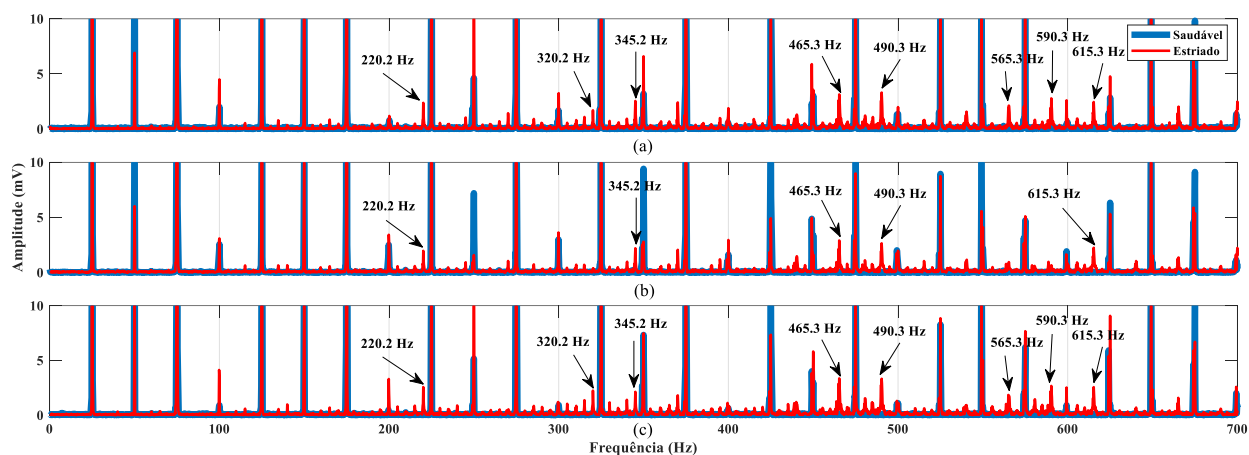


Figura 4.2-20 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

No ensaio em vazio foram identificadas nas tensões induzidas diferenciais diversas componentes de frequência associadas quer às frequências de avaria típicas do anel externo quer às frequências do anel interno. Para as frequências típicas do anel externo foram encontradas as frequências 220.166 Hz ($k=3$), 320.166 Hz ($k=3$), 490.333 Hz ($k=6$) e 590.333 Hz ($k=6$). Para o anel interno são de destacar as frequências 345.166 Hz ($k=2$), 465.333 Hz ($k=4$), 565.333 Hz ($k=4$) e 615.333 Hz ($k=4$).

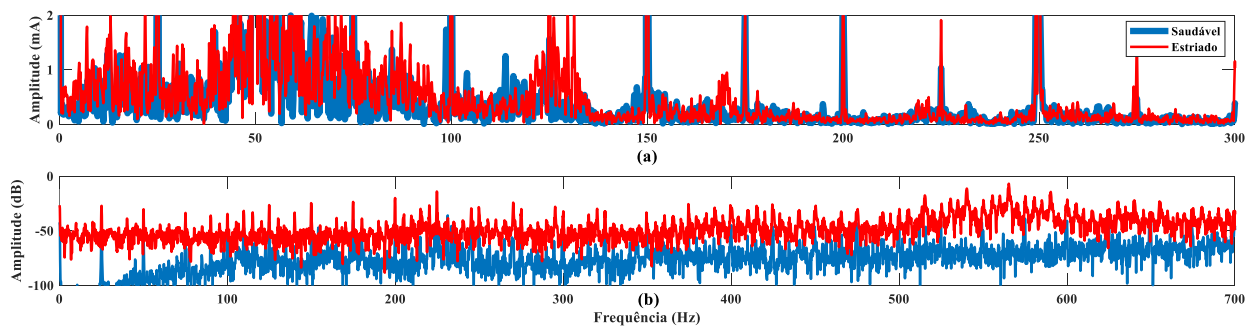


Figura 4.2-21 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

Para esta situação a análise das correntes de alimentação não foi conclusiva para o diagnóstico da avaria, notando-se apenas um aumento generalizado da amplitude das componentes de corrente entre os 125 Hz e os 135 Hz. Também nas vibrações, apesar do aumento generalizado do nível de vibrações, é difícil encontrar componentes especificamente associadas à avaria, uma vez que existem componentes de elevada amplitude numa gama alargada de frequências.

Tabela 4.2-12 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em vazio com avaria generalizada. Frequências relativas ao anel externo.

k	Tensões induzidas diferenciais (Fase U)					Corrente de alimentação (Fase R)			
	Freq. Teórica (Hz)	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
3	220.168	220.166	-82.7	-52.7	30.0				
	320.168	320.166	-79.8	-55.6	24.2				
6	490.336	490.333	-84.2	-49.8	34.4				
	590.336	590.333	-82.9	-51.3	31.6				

Tabela 4.2-13 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e na corrente de alimentação para o ensaio em vazio com uma avaria generalizada. Frequências relativas ao anel interno.

k	Freq. Teórica (Hz)	Tensões induzidas diferenciais (Fase U)				Corrente de alimentação (Fase R)			
		Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
2	344.261	345.166	-79.0	-52.1	26.9				
4	463.621	465.333	-86.5	-50.3	36.2				
	513.111								
	563.621	565.333	-80.7	-53.6	27.1				
	613.555	615.333	-78.3	-52.4	25.9				

Pelas tabelas anteriores é observável a distribuição de frequências de acordo com a sua origem: anel interno e anel externo. Para as diferentes frequências assinaladas regista-se uma variação de amplitude relativamente constante. Assim, o método revela-se igualmente sensível para os avarias presentes no rolamento no anel externo e no anel interno.

Funcionamento do Motor com Carga Elevada

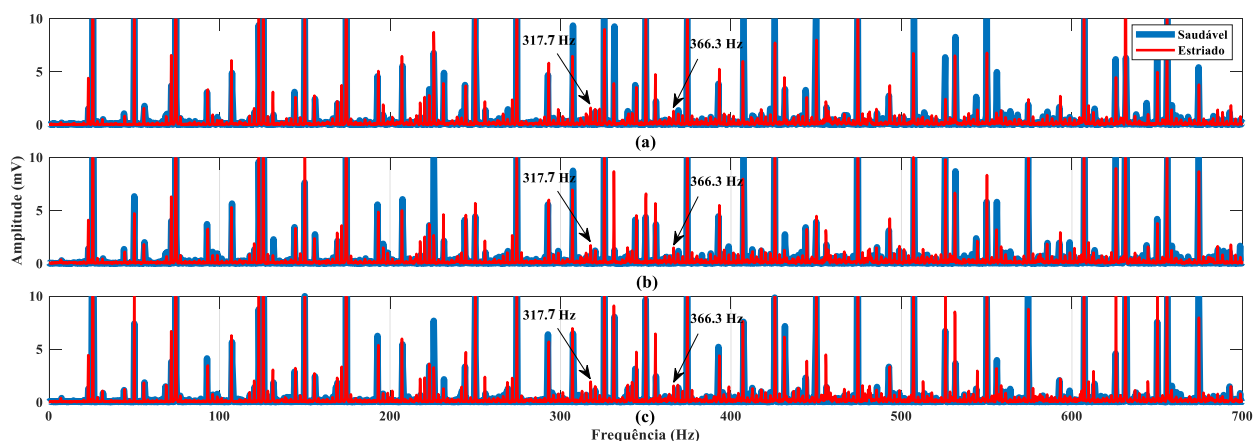


Figura 4.2-22 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

No ensaio com carga elevada existe uma marcada diminuição do número de componentes espectrais visíveis nas tensões induzidas diferenciais, bem como uma redução da amplitude destas. Desta forma, apenas foi possível identificar as componentes espectrais às frequências 317.666 Hz ($k=3$, anel interno) e 366.333 Hz ($k=3$, anel interno), que sofreram um ligeiro

aumento durante a avaria. Regista-se assim, uma vez mais, o efeito da atenuação das componentes de avaria provocada pelo aumento do nível de carga do motor.

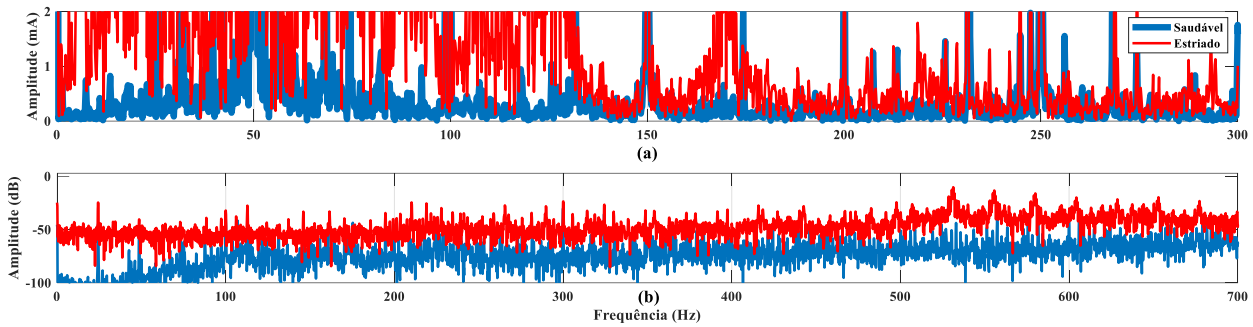


Figura 4.2-23 – Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

Durante este ensaio registou-se ainda um aumento de amplitude generalizado da corrente de alimentação, especialmente para as frequências mais baixas, resultado das variações de binário do motor provocadas pelo estriamento das pistas do rolamento. No entanto, não foi possível identificar na corrente qualquer componente relacionada diretamente com a avaria que permitisse o seu diagnóstico. Também para as vibrações existe um aumento generalizado da sua amplitude para todas as frequências, sem existir, no entanto, qualquer componente de frequência típica que permita a identificação da avaria através da vibração da carcaça do motor.

Tabela 4.2-14 - Variação de amplitude das componentes de frequências típicas de avaria para os métodos de diagnóstico baseados nas tensões induzidas diferenciais e nas correntes de alimentação para o ensaio em carga elevada com avaria generalizada. Frequências relativas ao anel interno.

k	Freq. Teórica (Hz)	Tensões induzidas diferenciais (Fase U)				Corrente de alimentação (Fase R)			
		Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB	Freq. Real (Hz)	Amp. Saudável (dB)	Amp. Avaria (dB)	Δ dB
3	319.351	317.666	-64.0	-56.1	7.9				
	368.017	366.333	-66.3	-57.9	8.4				
	419.351								
	468.017								

4.2.6. Avaria Generalizada no Anel Externo e Interno e Alimentação por Conversor de Frequência

Por fim foi testada a detecção da avaria no rolamento 6206 estriado nos anéis externo e interno para o motor alimentado por um conversor de frequência, com o objetivo de testar a eficácia desta técnica de diagnóstico para a alimentação não-sinusoidal do motor.

Para esta situação foi utilizado um conversor de frequência ABB ACS-355 para a alimentação do motor de indução, com uma frequência de comutação de 4 kHz e velocidades de rotação iguais às obtidas nos ensaios com alimentação a partir da rede. Assim, garantiu-se a alimentação do motor a 50 Hz de modo a não alterar as frequências de avaria características para as situações em análise.

De modo a filtrar as componentes espectrais introduzidas pelo conversor de frequência nas tensões induzidas, as tensões induzidas foram filtradas por filtros passa-baixo analógicos com uma frequência de corte de 9,2 kHz. Esta frequência foi escolhida para minimizar quaisquer efeitos de *aliasing* do sinal e permitir o cumprimento do teorema de Nyquist, uma vez que a frequência de amostragem se manteve nos 20 kHz.

Funcionamento do Motor em Vazio

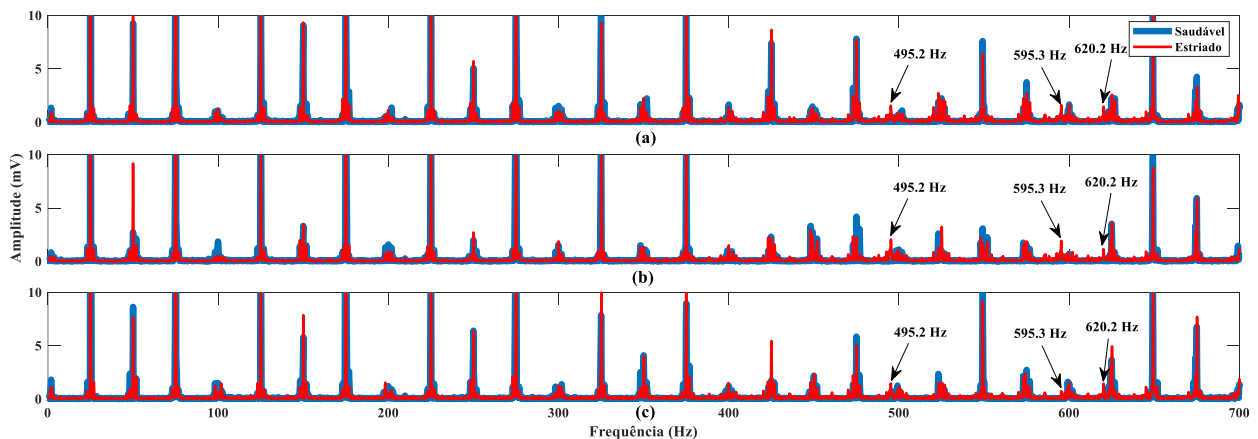


Figura 4.2-24 - Espetros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

No ensaio em vazio foi possível identificar no espectro de tensões induzidas diferenciais a presença de algumas componentes de frequência que permitem a identificação da avaria no rolamento, especialmente para frequências um pouco mais elevadas. Foram identificadas as

componentes às frequências 495.166 Hz ($k=6$, anel externo), 595.333 Hz ($k=5$, anel interno) e 620.166 Hz ($k=4$, anel interno).

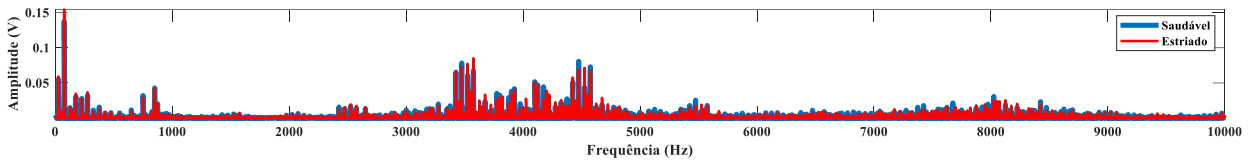


Figura 4.2-25 - Espectro da tensão diferencial relativa à fase U para o motor saudável e para o motor com uma avaria generalizada nos anéis externo e interno, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência.

De destacar nestes espectros uma maior amplitude das tensões induzidas diferenciais em torno das frequências de comutação do conversor de frequência (4 kHz) com repetição na região dos 8 kHz. Não foi possível identificar frequências de avaria nestas regiões, mas o aumento da amplitude das componentes para estas frequências é assinalável.

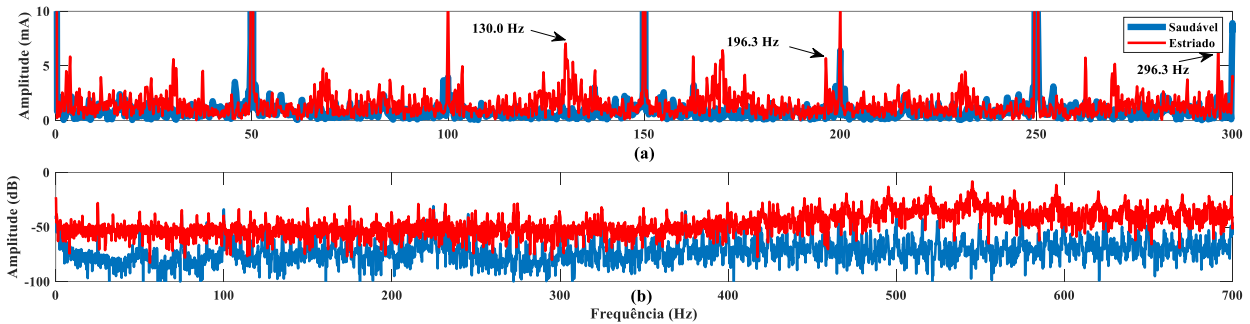


Figura 4.2-26 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor em vazio com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção do radial.

Nas correntes de alimentação foram observadas algumas frequências características de avaria que permitem o diagnóstico da avaria, nomeadamente as frequências 130.000 Hz ($k=2$, anel externo), 196.333 Hz ($k=2$, anel interno) e 296.333 Hz ($k=2$, anel interno).

No espectro de frequência das vibrações da carcaça do motor registou-se um aumento generalizado do nível de vibração, semelhante ao registado para a alimentação sinusoidal, sem, no entanto, serem perceptíveis frequências-chave que permitam a identificação da avaria através desta técnica.

Funcionamento do Motor com Carga Elevada

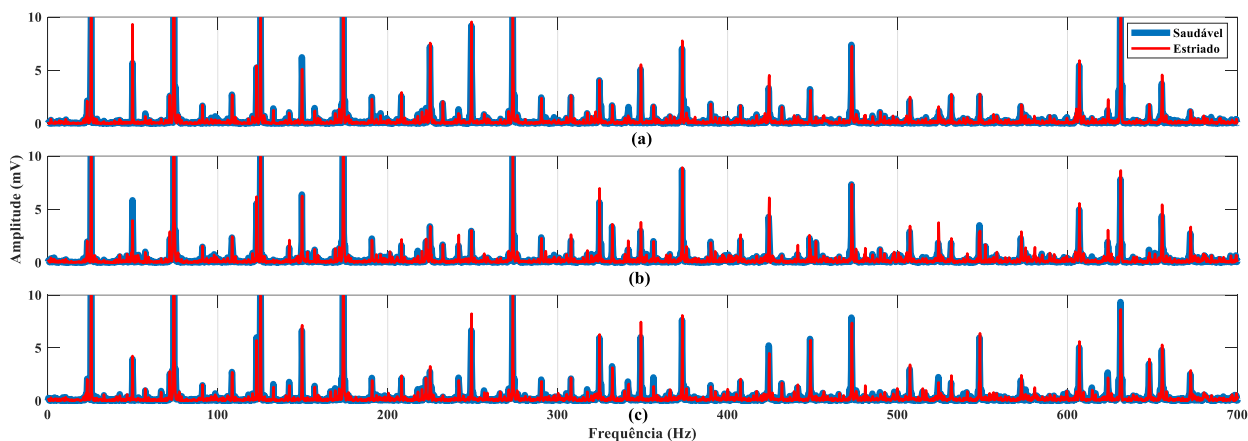


Figura 4.2-27 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Nos ensaios realizados em carga elevada para alimentação do motor de indução trifásico através do conversor de frequência registou-se uma atenuação das componentes espectrais características da avaria nas tensões induzidas diferenciais. Assim, conclui-se que a atenuação destas componentes provocada pelo aumento do nível de carga é independente do tipo de alimentação do motor.

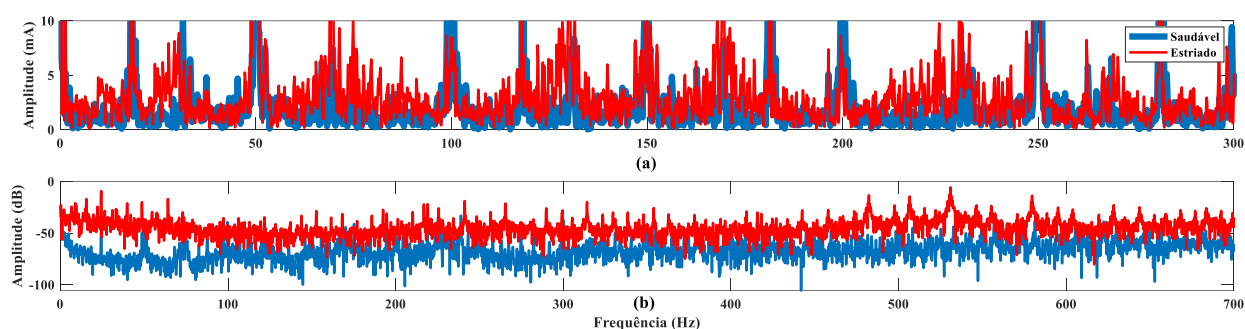


Figura 4.2-28 - Espectros das correntes e vibrações para o funcionamento do motor a carga elevada com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência para: (a) corrente I_R ; (b) vibração na direção radial.

Nos espectros da corrente de alimentação do motor verificou-se um aumento do “ruído” no espectro da corrente, com uma maior amplitude geral do sinal para a gama de frequências

analisada. No entanto, devido ao elevado ruído deste espectro não foi possível a identificação de componentes de frequência relacionadas com a avaria.

Também na vibração se verifica um aumento do nível geral da amplitude do sinal, mas não foi possível a identificação das componentes espectrais relacionadas com a avaria em estudo, condição que também se verificou para uma alimentação sinusoidal do motor.

5. Conclusão e Trabalho Futuro

5.1 Conclusão

O trabalho apresentado nesta dissertação incidiu sobre o desenvolvimento de uma nova técnica de diagnóstico de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos baseada na análise de tensões induzidas diferenciais em bobinas de prova instaladas no estator do motor. Esta técnica distingue-se de técnicas anteriores pela facilidade de processamento dos sinais obtidos, pela utilização de hardware barato e facilmente incorporável no motor durante o seu fabrico ou reparação e pela robustez do método a perturbações externas à máquina.

As avarias mais comuns em rolamentos de motores elétricos e as suas características foram simuladas através de rolamentos previamente danificados com o objetivo de representarem de forma aproximada as condições de funcionamento dos rolamentos para cada situação de avaria, possibilitando assim o diagnóstico das avarias em condições mais próximas daquelas que seriam encontradas em ambiente industrial para rolamentos danificados.

Além do método das tensões induzidas diferenciais, foram ainda utilizados métodos de diagnóstico baseados na análise das vibrações da carcaça do motor e correntes de alimentação, com o objetivo de comparar a eficácia e sensibilidade do método proposto com alguns métodos já utilizados no diagnóstico deste tipo de avarias.

A análise dos dados relativos aos ensaios realizados remete para algumas conclusões interessantes. Primeiro, conclui-se ser possível o diagnóstico de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos através da análise em frequência das tensões induzidas diferenciais em conjuntos de bobinas de prova, método de diagnóstico proposto neste documento. No entanto, fica claro que o nível de carga do motor, assim como a extensão da própria avaria e também o local exato onde a avaria se encontra no próprio rolamento influenciam a eficácia deste método de diagnóstico, tal como acontece com os métodos de diagnóstico tomados como termo de comparação. Assim sendo, apurou-se que um nível de carga superior provoca uma diminuição do diferencial entre a amplitude do sinal saudável e a amplitude do sinal característico da avaria, para qualquer tipo de avaria ou severidade. Por outro lado, uma avaria com uma severidade superior provocará um aumento da amplitude e do número de componentes espectrais visíveis no espectro para as avarias no anel externo do rolamento, enquanto que para

avarias no anel interno não se registaram diferenças dignas de nota entre níveis de severidade da avaria distintos.

Outra conclusão relevante a retirar deste trabalho é a influência da localização da avaria no rolamento. Assim, uma avaria localizada no anel externo é mais facilmente detetada para as mesmas condições de funcionamento do que uma avaria no anel interno, algo verificado nos diferentes métodos de diagnóstico analisados. De especial relevância é a possibilidade de diagnóstico de uma avaria generalizada nos anéis do rolamento através do método das tensões induzidas diferenciais, uma vez que este tipo de avaria não foi detetado de forma conclusiva com os métodos de controlo utilizados e constitui uma das avarias mais comuns em rolamentos de motores de indução trifásicos. Enquanto que na vibração houve apenas um aumento generalizado do nível de vibração da carcaça do motor, sem componentes de vibração específicas que permitissem identificar corretamente a avaria, na corrente de alimentação não foi possível encontrar um padrão de frequências marcado que permitisse detetar de forma inequívoca a avaria. Por seu turno, a análise espectral das tensões induzidas diferenciais revelou a existência de componentes de frequências marcadas e inequívocas matematicamente relacionáveis com o tipo de avaria presente.

Foi ainda realizado um ensaio com o motor de indução trifásico alimentado por um conversor de frequência, com o rolamento do lado da carga estriado nos anéis externo e interno onde foi possível identificar um padrão de avaria no espectro das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento em vazio. No entanto, devido ao efeito de atenuação provocado pelo aumento de carga, para cargas elevadas não foi possível a identificação conclusiva de componentes relacionadas com a avaria. O mesmo padrão foi encontrado nas correntes de alimentação do motor, uma vez que é possível a identificar a avaria através da análise espectral das correntes de alimentação para o motor a funcionar em vazio, mas não com carga elevada. Por fim, nos espectros de vibração da carcaça do motor não foi possível identificar para nenhum caso frequências associadas à avaria em estudo, tendo sido o resultado desta análise semelhante ao da mesma avaria quando o motor foi alimentado através do autotransformador.

Sobre o método das tensões induzidas diferenciais, apesar da existência de componentes espectrais para frequências elevadas (superiores a 1 kHz), a informação nelas contida a frequências inferiores torna redundante a análise aprofundada de cada componente de frequência a altas frequências. No entanto esta característica não deverá ser ignorada, uma vez que em certas aplicações específicas pode ser vantajosa a análise de frequências elevadas. A existência de componentes de tensão induzida diferencial a altas frequências é possível devido à imunidade das tensões ao aumento da impedância provocado pelo aumento da frequência, ao contrário dos métodos baseados na análise de correntes, onde, devido a estas mesmas impedâncias, se torna praticamente impossível a identificação de componentes espectrais de interesse para frequências superiores a 300 Hz.

O método das tensões induzidas diferenciais revelou-se interessante no diagnóstico de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos, com características desejáveis para um método de detecção de avarias eficaz. Este método demonstrou uma elevada sensibilidade à avaria, o que permitiu em praticamente todas as situações analisadas um inequívoco diagnóstico da avaria. Mais ainda, este método permite a identificação do tipo de avaria no rolamento através da identificação das componentes de frequência prevalentes. Apesar de existir uma clara degradação da sensibilidade deste método para situações de carga elevada, tal não é provocado por limitações deste método para cargas elevadas, mas sim por um efeito de amortecimento mecânico do veio do motor pela carga, que reduz substancialmente as oscilações mecânicas provocadas pelo rolamento defeituoso.

5.2 Trabalho Futuro

O potencial revelado pelo método de diagnóstico baseado em tensões induzidas diferenciais no diagnóstico quer de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos desenvolvido durante esta dissertação quer de avarias em barras rotóricas referido em alguma literatura de suporte a este trabalho, abre as portas para novas aplicações desta técnica.

Uma sugestão para a continuação da investigação desta técnica de diagnóstico seria a utilização e comparação de diferentes técnicas de processamento de sinal, com vista ao refinamento do método e potenciar a sua utilidade no diagnóstico de diferentes tipos de avaria.

Seria também interessante o aprofundamento do estudo deste método de detecção de avarias para motores alimentados por conversores de frequência.

Sugere-se ainda, por fim, a aplicação desta técnica de diagnóstico a outras máquinas elétricas, como o motor síncrono de ímanes permanentes ou o motor de relutância, cada vez mais comuns na indústria moderna.

Bibliografia

- [1] M. Peltola, “Slip of ac induction motors and how to minimize it,” *Drives Mag*, 19 Agosto 2002.
- [2] S. Nandi, H. A. Toliyat e L. Xiaodong, “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review,” em *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, 2005, pp. 719-729.
- [3] Z. Pinjia, D. Yi, T. G. Habetler e L. Bin, “A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors,” em *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, 2011, pp. 34-46.
- [4] R. R. Obaid, T. G. Habetler e J. R. Stack, “Stator Current Analysis for Bearing Damage Detection in Induction Motors,” em *Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Atlanta, GA, USA, 2003.
- [5] I. Önel e M. Benbouzid, “Induction Motor Bearing Failure Detection and Diagnosis: Park and Concordia Transform Approaches Comparative Study,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 13, no. 2, pp. 257-262, Abril 2008.
- [6] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran e R. G. Bartheld, “Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No 6, pp. 1274-1279, 1995.
- [7] R. F. Schiferl e M. J. Melfi, “Bearing Current Remediation Options,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 40-50, Julho 2004.
- [8] J. R. Stack, T. G. Habetler e R. G. Harley, “Fault Classification and Fault Signature Production for Rolling Element Bearings in Electric Machines,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 735-739, Junho 2004.
- [9] M. J. M. Gonçalves, R. C. Creppe, E. G. Marques e S. M. A. Cruz, “Diagnosis of bearing faults in induction motors by vibration signals – comparison of multiple signal processing approaches,” em *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Búzios, RJ, Brasil, 2015.
- [10] B. P. Graney e K. Starry, “Rolling Element Bearing Analysis,” *Materials Evaluation*, Vol.70, no. 1, pp. 78-85, 2011.
- [11] B. Li, M.-Y. Chow, Y. Tipsuwan e J. C. Hung, “Neural-Network-Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 1060-1069, 2000.
- [12] M. Blödt, P. Granjon, B. Raison e G. Rostaing, “Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 1813-1822, 2008.
- [13] X. Liang e K. Edomwandekhoe, “Condition monitoring techniques for induction motors,” em *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Cincinnati, OH, USA, 2017.
- [14] L. Frosini e E. Bassi, “Stator Current and Motor Efficiency as Indicators for Different Types of Bearing Faults in Induction Motors,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, pp.

244-251, Janeiro 2010.

- [15] G. Mirzaeva, K. I. Saad e M. G. Jahromi, “Comprehensive Diagnostics of Induction Motor Faults Based on Measurement of Space and Time Dependencies of Air Gap Flux,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, No. 3, pp. 2657-2666, Maio 2017.
- [16] I. Ozelgin, “Analysis of magnetic flux density for airgap eccentricity and bearing faults,” *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, Issue 4, Vol. 2, pp. 162-169, 2008.
- [17] D. G. Dorrell, “Sources and Characteristics of Unbalanced Magnetic Pull in Three-Phase Cage Induction Motors With Axial-Varying Rotor Eccentricity,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 1, pp. 12-24, Janeiro 2011.
- [18] M. Dubravko, “Brief Review of Motor Current Signature Analysis,” Zagreb, Croácia, 2015.
- [19] M. J. M. Gonçalves, “Técnicas avançadas de processamento de sinal no diagnóstico de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos,” Dissertação de Mestrado, DEEC, UC, 2015.
- [20] “Mechanical vibration -- Measurement and evaluation of machine vibration -- Part 1: General guidelines,” ISO 20816-1:2016, 2016.
- [21] J. R. Stack, “Fault signature detection for rolling element bearings in electric machines,” Dissertação de Doutorado, Georgia Institute of Technology, Novembro de 2002.
- [22] W. Zhou, T. G. Habetler e R. G. Harley, “Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review,” 2007.
- [23] P. J. Tavner e J. Penman, *Condition Monitoring of Electrical Machines*, Letchworth, England: Research Studies Press Ltd., 1987.
- [24] B. Maru e P. A. Zotos, “Anti-friction bearing temperature rise for NEMA frame motors,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 5, pp. 883-888, 1989.
- [25] J. A. Henao-Sepulveda, M. Toledo-Quiñones e Y. Jia, “Contactless Monitoring of Ball Bearing Temperature,” em *IMTC 2005-Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Ottawa, Canada, 2005.
- [26] M. W. Hawman e W. S. Galinaitis, “Acoustic emission monitoring of rolling element bearings,” em *IEEE 1988 Ultrasonics Symposium Proceedings*, Chicago, IL, USA, 1988.
- [27] R. B. W. Heng e M. J. M. Nor, “Statistical Analysis of Sound and Vibration Signals for Monitoring Rolling Element Bearing Condition,” *Applied Acoustics*, Vol. 53, No. 1-3, pp. 211-226, 1998.
- [28] Y. Shao e K. Nezu, “Bearing fault detection using laser displacement sensor,” em *35th SICE Annual Conference*, Tottori, Japão, 1996.
- [29] G. Mirzaeva e K. Saad, “AC motor instrumentation and main air gap flux measurement for fault diagnostics,” em *Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2013*, Hobart, TAS, Austrália, 2013.
- [30] K. Saad e G. Mirzaeva, “Space Harmonics Analysis of the Main Air Gap Flux of an Induction Motor and its Applicability to Detect Faults,” em *Australasian Universities Power Engineering*

Conference, AUPEC 2014, Perth, Austrália, 2014.

- [31] Y. Soleimani, S. M. A. Cruz e F. Haghjoo, “Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors Based on Air-Gap Rotational Magnetic Field Measurement” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
- [32] H. Dehghan, F. Haghjoo e S. M. A. Cruz, “A Flux-Based Differential Technique for Turn-to-Turn Fault Detection and Defective Region Identification in Line-Connected and Inverter-Fed Induction Motors,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 4, pp. 1876-1885, Dezembro 2018.
- [33] G. Mirzaeva e K. Saad, “Advanced Diagnosis of Rotor Faults and Eccentricity in Induction Motors Based on Internal Flux Measurement,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2981-2991, Maio 2018.
- [34] J. A. C. Agostinho, “Diagnóstico de avarias nos rolamentos de um motor de indução trifásico,” 2013.
- [35] L. A. C. Lopes, “Diagnóstico de avarias e correntes parasita em rolamentos de motores”.

ANEXO I – Tensões Induzidas Diferenciais do Motor à Meia Carga

Avaria de 4 mm no Anel Externo, Lado do Ventilador

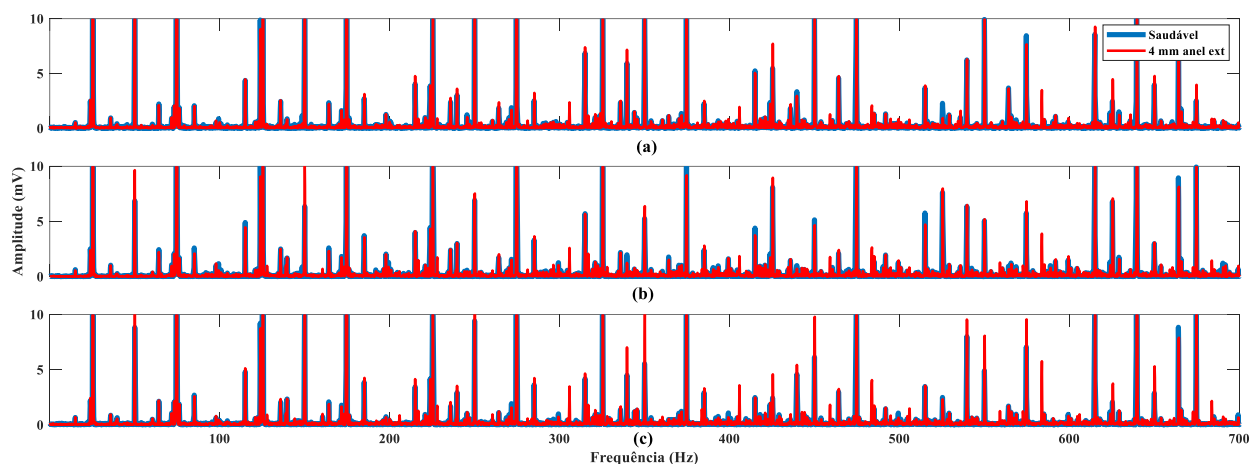


Figura I-5.21 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel externo, no rolamento do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Avaria de 2 mm no Anel Externo, Lado do Ventilador

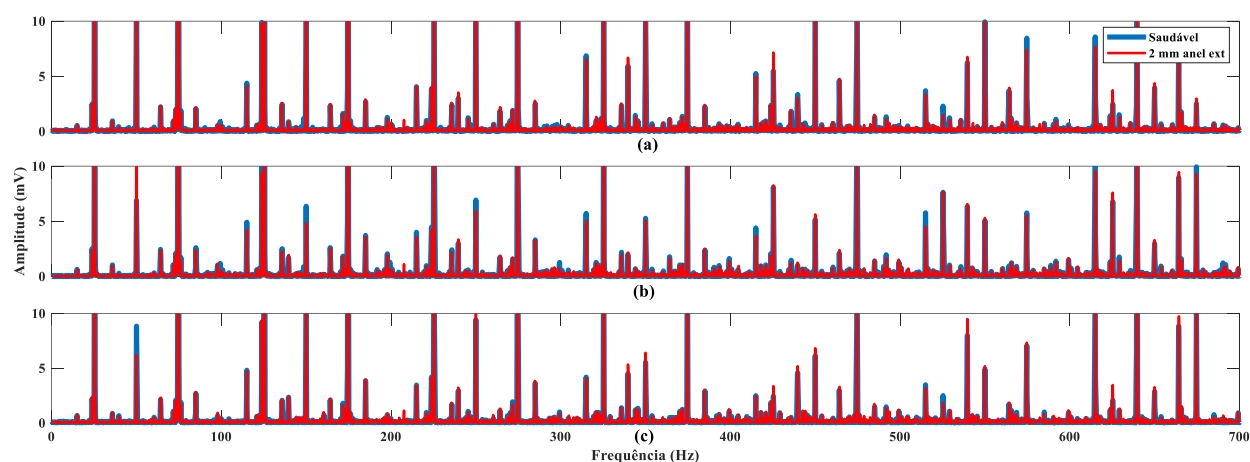


Figura I-2 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel externo, no rolamento do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Avaria de 4 mm no Anel Interno, Lado do Ventilador

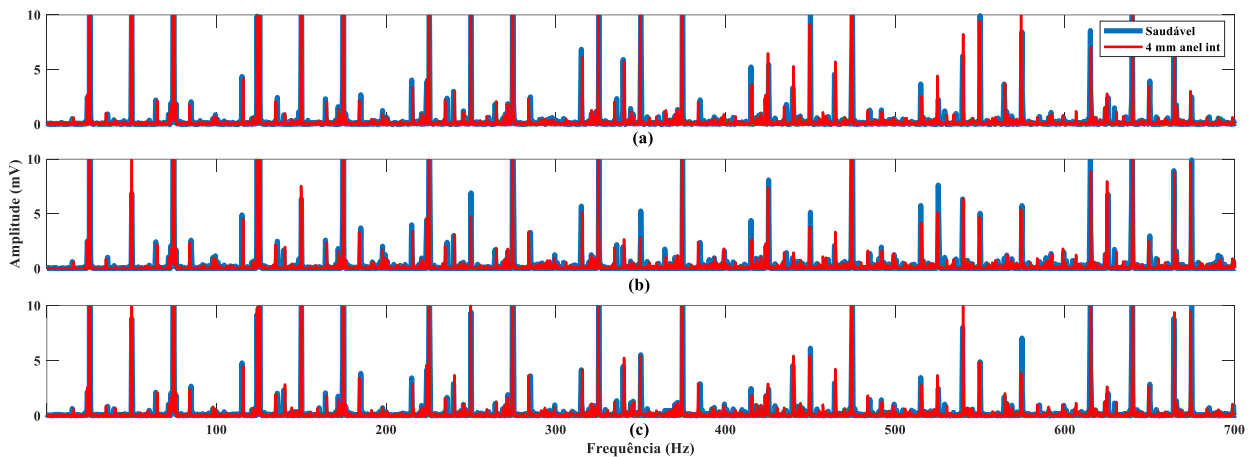


Figura I-3 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 4 mm no anel interno, no rolamento do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Avaria de 2 mm no Anel Interno, Lado do Ventilador

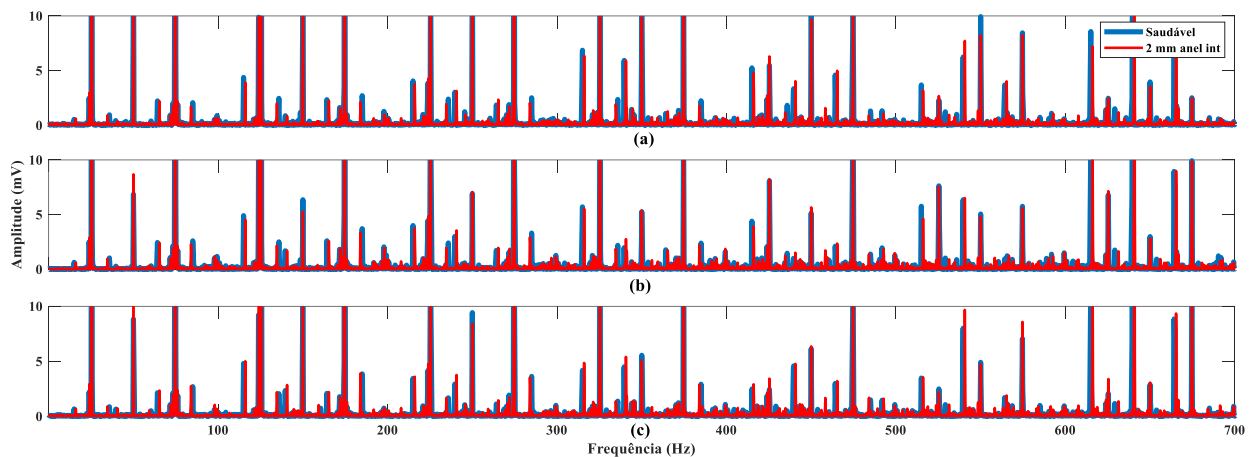


Figura I-4 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria de 2 mm no anel interno, no rolamento do lado do ventilador para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Avaria Generalizada no Anel Externo e Interno, Lado da Carga

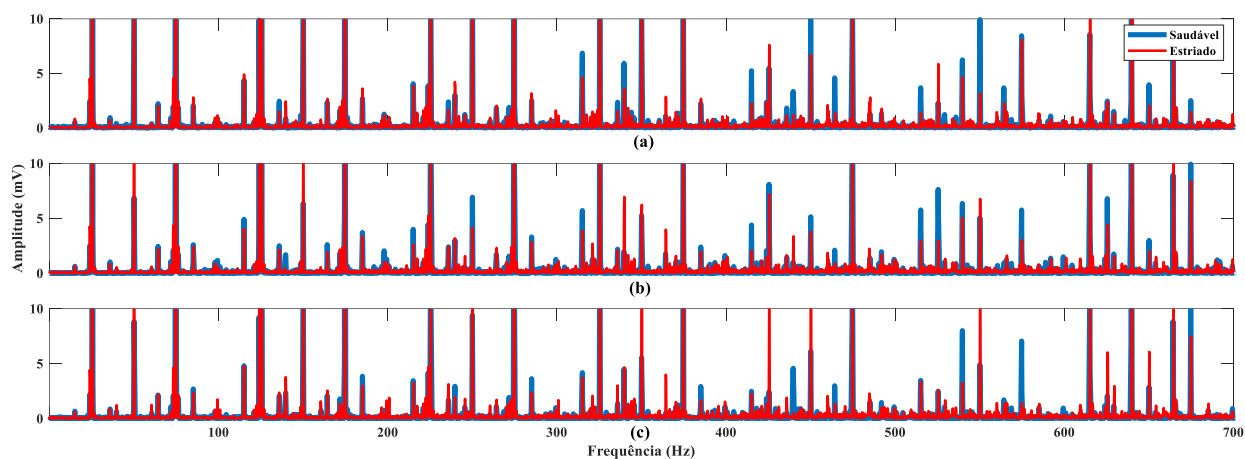


Figura I-5 - Espectros das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

Avaria Generalizada no Anel Externo e Interno, Lado da Carga, Alimentado por Conversor de Frequência

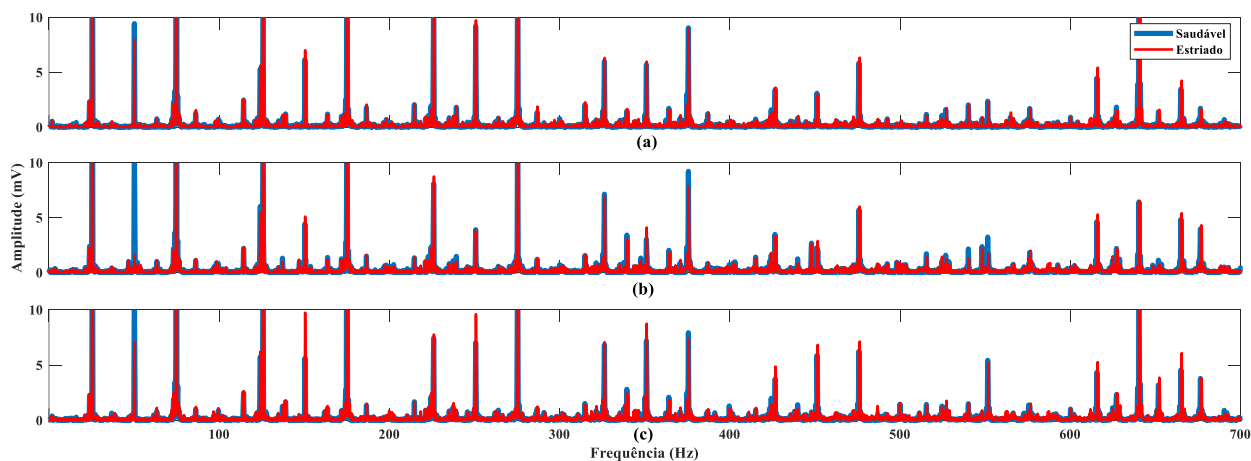


Figura I-6 - Espectros representativos das tensões induzidas diferenciais para o funcionamento do motor à meia carga com rolamentos saudáveis e com uma avaria generalizada nos anéis interno e externo, do lado da carga, alimentado por conversor de frequência para: (a) fase U; (b) fase V; (c) fase W.

ANEXO II – Características das Máquinas Elétricas Utilizadas no Procedimento Experimental

Tabela II-1 - Características técnicas do motor de indução trifásico

Marca	WEG
Tensão	400/690 V (Δ/Y)
Corrente nominal	6.15/3.57 A (Δ/Y)
Frequência	50 Hz
Potência	3 kW
Número de polos	4
Velocidade nominal	1440 rpm
Fator de potência	0.8

Tabela II-2 - Características técnicas da máquina de corrente contínua

Marca	AEG
Tensão	220 V
Corrente nominal	17 A
Potência	3 kW (Mot)/4 kW (Ger)
Velocidade nominal	1450 rpm