



João António Carvalho Agostinho

DIAGNÓSTICO DE AVARIAS NOS ROLAMENTOS
DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Dissertação de Mestrado
Setembro 2013



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Universidade de Coimbra

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Diagnóstico de Avarias nos Rolamentos de um Motor de Indução Trifásico

João António Carvalho Agostinho

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Pedro de Almeida Barreto

Orientador: Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz

Vogal: Professor Doutor Mário João Simões Ferreira dos Santos

Coimbra, Setembro de 2013

A presente dissertação não foi escrita ao abrigo do novo Acordo Ortográfico.

Agradecimentos

Quero expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram para a realização desta dissertação, mas em particular agradecer ao Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz pela orientação e pela inteira disponibilidade demonstrada.

Quero também agradecer a todos os meus colegas de laboratório pelo companheirismo e apoio prestado, especialmente ao Filomeno Vieira e ao André Gonçalves que sempre se mostraram disponíveis.

Por último, agradeço a toda a minha família, namorada e amigos, sem os quais não teria chegado até aqui.

Resumo

As avarias em rolamentos de motores de indução têm sido alvo de vários estudos por parte de fabricantes e investigadores devido ao impacto negativo que estas têm na operacionalidade dos motores. Com a evolução evidente ao nível da parte eléctrica do motor as avarias nos rolamentos tornaram-se as mais frequentes, daí a importância de encontrar métodos de diagnóstico eficazes e preventivos.

Os rolamentos são elementos mecânicos essenciais ao funcionamento do motor, tendo sido desenvolvidos diferentes tipos para servir diversas aplicações. Entre outros factores, o tipo de carga, a velocidade, o ambiente envolvente e o tipo de montagem são factores preponderantes para a escolha do tipo de rolamento. As avarias nos rolamentos podem ocorrer devido a desgaste típico do material, mas na generalidade existem um conjunto de situações stressantes que podem acelerar o processo de desgaste e que merecem a nossa atenção.

Quando ocorre uma determinada avaria é importante identificar o padrão da falha e conseguir relacioná-lo com a causa que a provocou. Assim sendo, já existem padrões de falha devidamente caracterizados que nos permitem através da observação retirar algumas conclusões acerca das causas que conduziram à falha. Por outro lado também existem um conjunto de técnicas e acções correctivas que permitem reduzir significativamente a ocorrência de avarias, estas técnicas são de natureza preventiva e são responsáveis, essencialmente, por eliminar algumas das causas que provocam a avaria.

Os métodos de diagnóstico utilizados para detectar este tipo de avarias têm sido alvo de estudos e a tendência é conseguir utilizar apenas métodos não invasivos, conseguindo chegar a uma conclusão acerca do defeito existente no rolamento com base nas tensões e correntes de alimentação do motor. Apesar da maioria dos sistemas de diagnóstico ainda se basearem na análise de vibrações mecânicas, nesta dissertação vão ser estudados métodos de diagnóstico não invasivos para detectar diferentes tipos de avarias.

Com o intuito de simular os padrões mais comuns de avaria, os rolamentos de teste foram alterados, por intermédio de brocas e limas, e colocados no motor de teste.

Para obter conclusões acerca dos métodos de diagnóstico utilizados, várias situações experimentais foram analisadas, incluindo avarias num único ponto e situações em que a falha se estende pela generalidade da superfície do rolamento.

Palavras-chave: rolamento, motor de indução, diagnóstico de avarias, métodos não invasivos.

Abstract

Faults in induction motors bearings have been the subject of several studies by manufacturers and researchers due to the negative impact they have on the engine operability. The evident evolution in electric parts of induction motors make bearing faults the most frequent, therefore the importance to find effective methods of diagnosis and prevention.

Bearings are essential mechanical elements for the properly engine operation and different types were developed to serve several applications. Among other factors, the type of load, speed, surrounding environment and the type of assembly are preponderant factors for choosing the type of bearing. Faults can occur due to typical wear of the material, but in general there are a number of stressful situations that can accelerate the wear and they deserve our attention.

When a particular fault occurs it is important to identify the pattern of failure and relate it to the cause. Therefore, there are already failure patterns properly characterized that allow us to get some conclusions about the causes that led to the failure. On the other hand there are also a set of techniques and corrective actions that will significantly reduce the occurrence of faults, these techniques are preventive and are, essentially, responsible for eliminating some of the causes that lead to malfunction.

The diagnostic methods used to detect this kind of faults have been investigated and the tendency is to use only non-invasive methods, achieving a conclusion about the defect in the bearing based on the voltage and current of motor's supply. Although most diagnostic systems are still based on the analysis of mechanical vibrations, in this master thesis, non-invasive diagnostic methods will be studied to detect different types of faults.

In order to simulate the most common forms of damage, the test bearings were changed through scratching and drilling and then placed in a test motor.

To reach conclusions about the diagnostic methods used, several experimental situations were analyzed, from damage situations of a single point failure to situations in which the failure extends over the majority of the bearing's surface.

Keywords: bearing, induction motor, fault diagnosis, non-invasive methods.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice.....	iv
Lista de Tabelas	vi
Lista de Figuras.....	vii
Abreviaturas.....	ix
Lista de Símbolos	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Rolamentos.....	3
1.3 Tipos de rolamentos	4
1.4 Requisitos de desenho	7
2. AVARIAS EM ROLAMENTOS	9
2.1 Causas das avarias.....	9
2.2 Técnicas de mitigação e acções correctivas	14
3. MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO.....	18
3.1 Análise das vibrações mecânicas	18
3.2 Análise físico-química do lubrificante	20
3.3 Análise da temperatura.....	20
3.4 Análise espectral da corrente estatórica de alimentação do motor.....	21
3.5 Análise EPVA (Extended Park's Vector Approach).....	22
4. PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	25

4.1	Preparação dos rolamentos com avarias.....	25
4.2	Descrição da montagem laboratorial.....	29
5.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	31
5.1	Situações de avaria testadas	31
5.2	Análise espectral da corrente estatórica	32
5.3	EPVA	43
6.	CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO	50
6.1	Conclusão.....	50
6.2	Sugestões de trabalho futuro	51
	Bibliografia.....	52

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Prós e contras de algumas técnicas de mitigação [19].	17
Tabela 4.1 - Dimensões dos rolamentos [9, 33].	25
Tabela 4.2 - Características nominais do motor de indução trifásico (estipuladas pelo fabricante).	29
Tabela 5.1 - Caracterização e numeração das avarias analisadas.	31
Tabela 5.2 - Frequências características de vibração do anel externo (f_{bor}) e anel interno (f_{bir}) de ambos os rolamentos (DE e NDE) e para dois níveis de carga diferentes.	32
Tabela 5.3 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente eléctrica estatórica e respectiva amplitude (caso 1).	33
Tabela 5.4 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente eléctrica estatórica e respectiva amplitude (caso 2).	36
Tabela 5.5 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente eléctrica estatórica e respectiva amplitude (caso 3).	37
Tabela 5.6 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente eléctrica estatórica e respectiva amplitude (caso 5).	39
Tabela 5.7 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA e respectiva amplitude (caso 1).	44
Tabela 5.8 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA e respectiva amplitude (caso 2).	45
Tabela 5.9 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA e respectiva amplitude (caso 3).	46
Tabela 5.10 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA e respectiva amplitude (caso 4).	47
Tabela 5.11 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA e respectiva amplitude (caso 5).	47

Lista de Figuras

Fig. 1.1 - Classificação das avarias do motor de indução [4].	2
Fig. 1.2 - Dimensões e elementos constituintes de um rolamento fixo de esferas.	3
Fig. 1.3 - Tipos de Rolamentos [9].	4
Fig. 1.4 - Esquema das diferentes tipologias de construção.	5
Fig. 2.1 - Fenómeno de <i>flaking</i> ou <i>spalling</i> .	10
Fig. 2.2 - Fenómeno de <i>false-brinelling</i> .	11
Fig. 2.3 - Circulação da corrente eléctrica no motor devido às tensões induzidas [2, 16].	13
Fig. 4.1 - Rolamentos perfurados num único ponto, quer no anel interno quer no anel externo.	26
Fig. 4.2 - Defeito provocado nas esferas.	27
Fig. 4.3 - Rolamentos perfurados ao longo de todo o perímetro do anel externo com furos de 5 e de 2 mm.	27
Fig. 4.4 - Rolamento cónico com estrias no anel externo.	28
Fig. 4.5 - Esquema representativo da montagem laboratorial que serviu para realizar os vários ensaios experimentais.	30
Fig. 5.1 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.	33
Fig. 5.2 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.	34
Fig. 5.3 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1446 rpm.	34
Fig. 5.4 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1446 rpm.	35
Fig. 5.5 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.	36
Fig. 5.6 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1446 rpm.	37
Fig. 5.7 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1446 rpm.	38
Fig. 5.8 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.	40

Fig. 5.9 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.	41
Fig. 5.10 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.	42
Fig. 5.11 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.	43
Fig. 5.12 - Representação da assinatura do EPVA com o motor a rodar a 1500 rpm.	44
Fig. 5.13 - Representação da assinatura do EPVA com o motor a rodar a 1500 rpm.	48
Fig. 5.14 - Representação da assinatura do EPVA com o motor a rodar a 1500 rpm.	49

Abreviaturas

hp	<i>Horse Power.</i>
EDM	<i>Electric Discharge Machining.</i>
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor.</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation.</i>
VFD	<i>Variable-Frequency Drive.</i>
rpm	Rotações por minuto.
FFT	<i>Fast Fourier Transform.</i>
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis.</i>
EPVA	<i>Extended Park's Vector Approach.</i>

Lista de Símbolos

f_{bor}	Frequência característica de vibração do anel externo (Hz)
f_{bir}	Frequência característica de vibração do anel interno (Hz)
f_{bs}	Frequência característica de vibração dos corpos rolantes (Hz)
f_r	Frequência mecânica do rotor (Hz)
D_p	Diâmetro primitivo (mm)
D_{cr}	Diâmetro do corpo rolante (mm)
N_{cr}	Número de corpos rolantes
β	Ângulo de contacto (graus)
f_s	Frequência de alimentação (Hz)
k	Número inteiro igual a 1, 2, 3...
f_n	Frequência característica de vibração (Hz)
f_{bng}	Frequência das componentes espectrais características da avaria no espectrograma da corrente do estator (Hz)
i_D, i_Q	Componentes do Vector de Park da corrente eléctrica (A)
i_A, i_B, i_C	Correntes de alimentação do motor (A)
I_M	Amplitude da corrente eléctrica de alimentação do motor (A)
ω_s	Frequência angular do sistema de alimentação (rad/s)
t	Tempo (s)
I_f	Amplitude do termo fundamental da corrente eléctrica de alimentação do motor, com avaria no rolamento (A)
I_{dl}	Amplitude da componente espectral da corrente eléctrica absorvida pelo motor associada à frequência $ f_s - k \times f_n $ (A)
I_{dr}	Amplitude da componente espectral da corrente eléctrica absorvida pelo motor associada à frequência $ f_s + k \times f_n $ (A)
α	Fase inicial do termo fundamental da corrente eléctrica de alimentação do motor (rad)

β_l	Fase inicial da componente espectral da corrente eléctrica de alimentação do motor associada à frequência $ f_s - k \times f_n $ (rad)
β_r	Fase inicial da componente espectral da corrente eléctrica de alimentação do motor associada à frequência $ f_s + k \times f_n $ (rad)
ω_n	Frequência angular natural (rad/s)
f_{epva}	Frequência das componentes espectrais características da avaria no espectrograma do EPVA (Hz)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O motor de indução foi inventado em 1880 por *Nikola Tesla*. Ao longo de mais de 120 anos ocorreram profundas alterações com o intuito de o aproximar de uma máquina perfeita, cada vez mais eficiente e funcional. É a máquina eléctrica mais utilizada na indústria e devido ao seu uso generalizado é habitualmente designado como sendo o “cavalo de força” da indústria. É usado em larga escala nas mais diversificadas aplicações, desde sistemas de aquecimento, arrefecimento, refrigeração, bombagem, tracção, entre outros. A sua construção robusta, a facilidade de manutenção e a boa relação custo-benefício são características que abonam a seu favor. Estes factores conduziram ao desenvolvimento e à padronização de toda uma infraestrutura de produção, culminando numa percentagem elevada de utilização do motor de indução; mais de 90% de todos os motores usados na indústria são motores de indução. Uma indicação evidente do progresso a que este tipo de motor foi sujeito é a evolução que o seu peso específico (kg de material por unidade de potência) e o seu preço de compra específico (US dólar por unidade de potência) registaram ao longo dos anos [1, 2].

Actualmente, o desenvolvimento de estratégias de controlo vectorial e a consequente possibilidade de controlo independente do fluxo magnético e do binário electromagnético desenvolvido pelo motor, conduziu a uma utilização do conjunto (motor de indução mais conversor de frequência) mais diversificada. Por isso, qualquer tipo de falha que ocorra pode ser catastrófica do ponto de vista do processo em que o motor está inserido, originando por vezes perdas muito superiores ao custo do próprio motor. Se por um lado a competitividade e as exigências do mercado têm um efeito positivo na melhoria dos desempenhos da generalidade dos equipamentos, por outro lado têm um aspecto negativo no que toca a problemas de operação e manutenção das máquinas. Deparamo-nos então com uma nova filosofia de manutenção, com critérios de qualidade, rentabilidade e disponibilidade de recursos numa metodologia de gestão global de empresa e um universo de máquinas com maiores exigências de desempenho, menores custos e, conseqüentemente, maior número de horas a operar sem actividades de manutenção [1-4].

Posto isto, é óbvio que apesar da fiabilidade apresentada pelo MIT (motor de indução trifásico), este também está sujeito a diversas avarias. Segundo [4-7], entre 40-50% das avarias registadas em motores de indução são consequência de anomalias que ocorrem nos rolamentos,

não sendo por mero acaso que a parte mecânica do MIT tem sido, ao longo dos tempos, conhecida como o calcanhar de Aquiles deste tipo de motor. A Fig. 1.1 ilustra de forma sintética o tipo de avarias que podem ocorrer nos motores de indução.

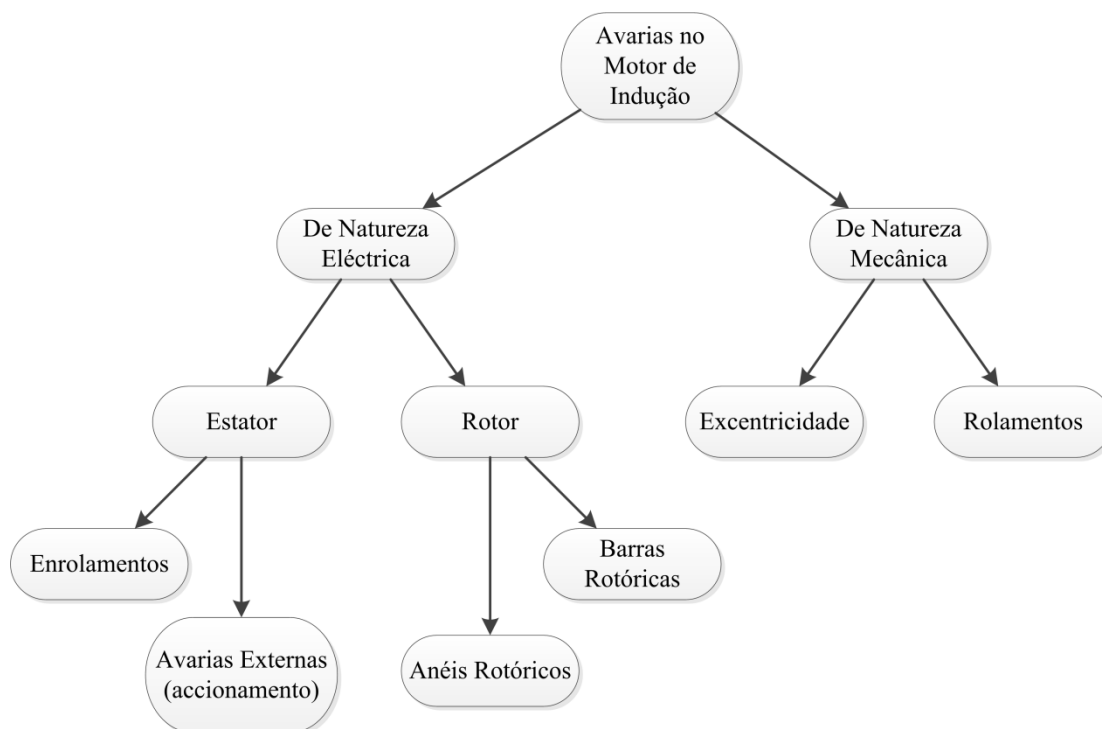


Fig. 1.1 - Classificação das avarias do motor de indução [4].

Com toda esta diversidade de avarias é natural que ao longo dos anos tenham surgido técnicas de diagnóstico que tentem detectar a avaria, ou mesmo prevê-la por forma a conseguir uma maior operacionalidade, assim como uma diminuição significativa dos custos de manutenção do motor.

Actualmente, a tendência é fazer o diagnóstico completo de uma máquina eléctrica com base nas suas tensões e correntes de alimentação sem que a máquina precise de interromper o seu funcionamento normal. Apesar do uso ainda alargado de sistemas que recorrem aos sinais vibratórios para diagnosticar avarias mecânicas, a tendência é recorrer a sinais eléctricos, pois estes constituem um método não invasivo de adquirir a informação necessária para o diagnóstico [5].

Assim sendo, torna-se importante encontrar uma forma eficaz de diagnosticar as avarias nos rolamentos do motor com base nos sinais eléctricos provenientes da alimentação do motor.

1.2 Rolamentos

Um rolamento pode ser definido como uma peça constituída por vários elementos, que serve para apoiar o movimento de componentes de uma máquina e evitar a fricção de deslizamento entre as superfícies do eixo e da chumaceira. Dos vários tipos de rolamentos existentes, muitos são uma combinação de três elementos: anéis com pistas, corpos rolantes (esferas ou rolos) e um elemento retentor que é a gaiola. O uso deste engenho mecânico poderá ter tido início na Escandinávia, por volta do ano 4000 A.C., posteriormente, várias civilizações contribuíram para o seu desenvolvimento, tornando-o no que actualmente representa [8].

A Fig. 1.2 ilustra de uma forma simplista a constituição de um rolamento fixo de esferas e as suas dimensões.

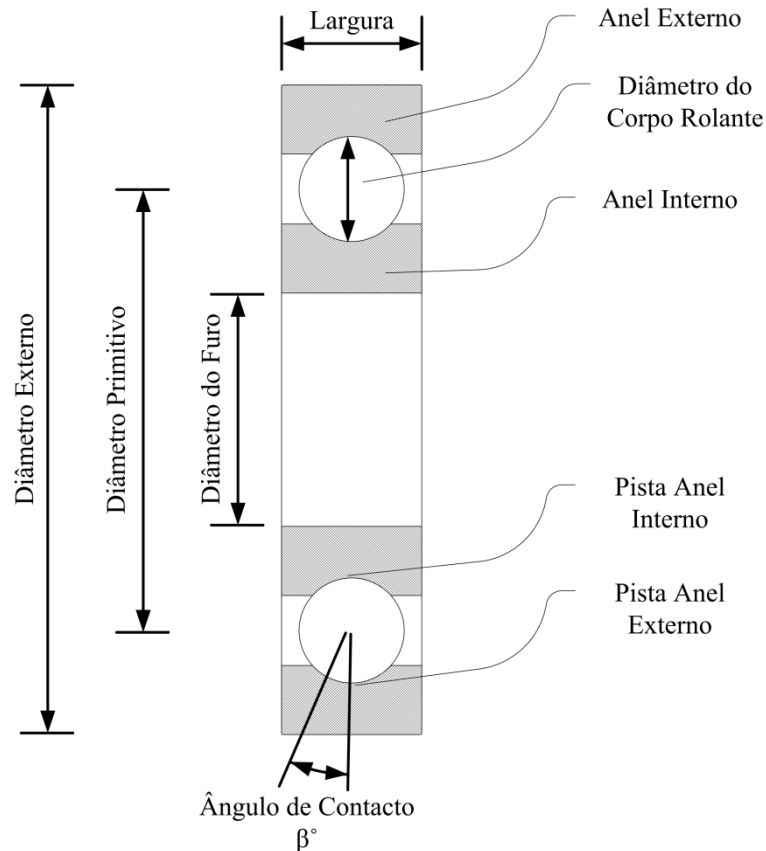


Fig. 1.2 - Dimensões e elementos constituintes de um rolamento fixo de esferas.

Do ponto de vista do projectista vários parâmetros têm que ser tidos em conta aquando da selecção do tipo de rolamento a aplicar em determinado sistema. Acima de tudo o projecto deve ser económico do ponto de vista do fabrico e da manutenção requerida no futuro.

1.3 Tipos de rolamentos

Como está ilustrado na Fig. 1.3, existem vários tipos de rolamentos que foram desenvolvidos para servir as aplicações mais diversas.

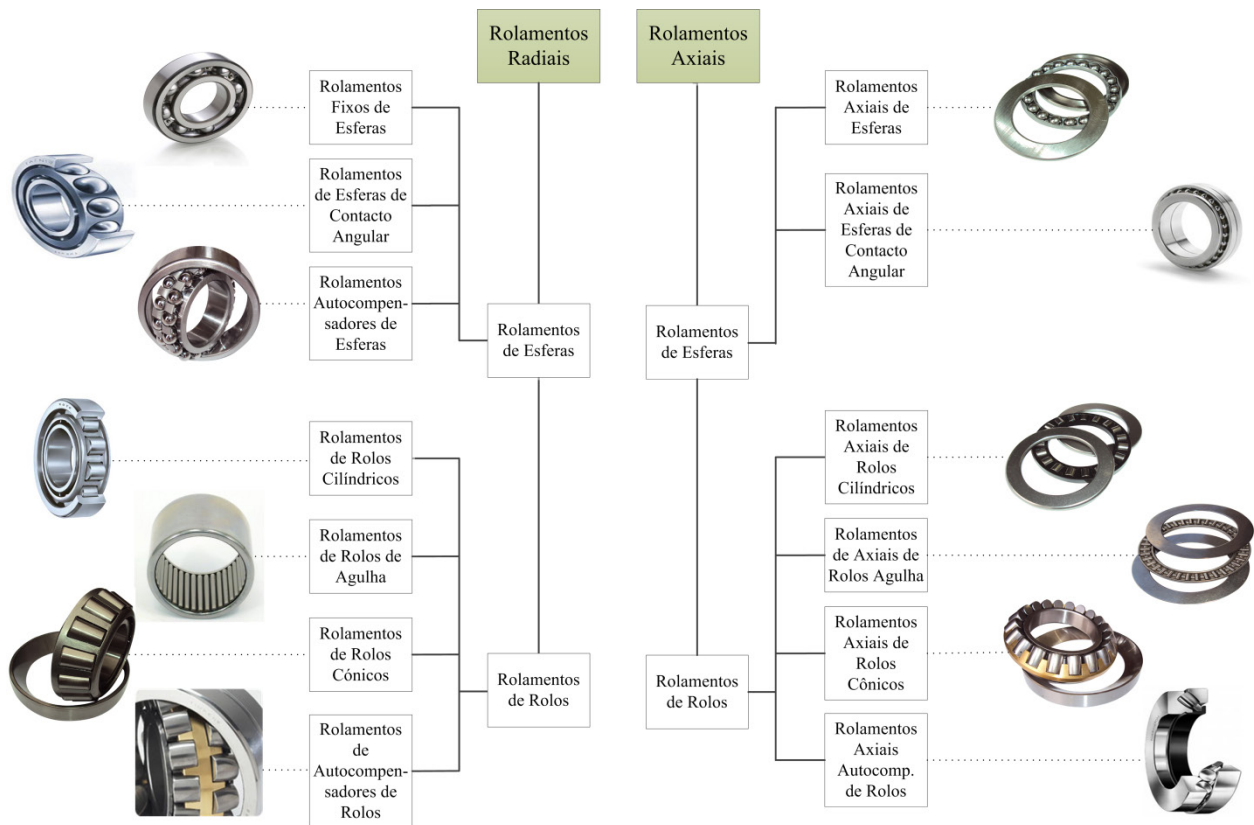


Fig. 1.3 - Tipos de Rolamentos [9].

Os rolamentos radiais dividem-se em três partes principais, a parte rotacional, a não rotacional e os corpos rolantes que estão entre estas duas partes. Destes elementos também faz parte uma gaiola que permite manter os elementos rolantes equidistantes entre si. Este tipo de rolamentos pode ser dividido em dois subgrupos consoante o corpo rolante que utiliza. Os corpos rolantes podem ser esferas ou rolos [10].

Os **rolamentos fixos de esferas** são usados em diversas aplicações, têm uma construção simples, as suas partes constituintes não são separáveis e podem operar a velocidades elevadas. Podem suportar carga radial combinada com carga axial moderada, mas têm uma baixa tolerância ao desalinhamento do eixo. Este tipo de rolamento não requer uma manutenção muito frequente e complicada, o que aliado a um custo reduzido faz com que seja uma solução popular e largamente utilizada [10].

Os **rolamentos autocompensadores de esferas** são soluções particulares para casos onde, por exemplo, um erro na montagem dê origem a desalinhamento, ou, de uma forma geral, seja

necessário dotar o eixo de movimento angular. Este tipo de rolamento tem duas carreiras de esferas que deslizam em duas pistas paralelas do lado do anel interno, enquanto do lado do anel exterior partilham uma única pista. Esta pista única do lado do anel exterior proporciona a capacidade de alinhamento própria dos rolamentos deste tipo [10].

Os **rolamentos de esferas de contacto angular** são ideais para combinar simultaneamente carga axial com carga radial. As pistas deste tipo de rolamento estão deslocadas uma relativamente à outra, por outras palavras, é o mesmo que dizer que o maior ângulo de contacto no anel exterior surge na face oposta do anel interior. Posto isto, percebe-se que se o rolamento tiver apenas uma carreira de esferas este só poderá suportar carga axial numa direcção. Devido à forma do rolamento, cargas radiais originam forças axiais no rolamento que devem ser contrabalançadas, geralmente esse contrabalanço é feito através da aplicação de outro rolamento. Estes rolamentos não permitem que as suas partes constituintes sejam separáveis, permitem velocidades de rotação relativamente elevadas, mas não toleram o desalinhamento do eixo [10].

Os **rolamentos de rolos cilíndricos** são particularmente úteis para elevadas cargas radiais permitindo velocidades de rotação elevadas. Os elementos rolantes são rolos cilíndricos, que são mantidos na posição desejada devido aos rebordos existentes no anel exterior ou no interior. Consoante a aplicação há diferentes formas de construir esses rebordos por forma a permitir o deslocamento axial em ambas as direcções, ou carga axial numa direcção e deslocamento noutra, etc. A capacidade destes rolamentos para suportar desalinhamentos do eixo é limitada [10]. A Fig. 1.4 ilustra o que foi descrito acerca dos rolamentos de rolos cilíndricos.

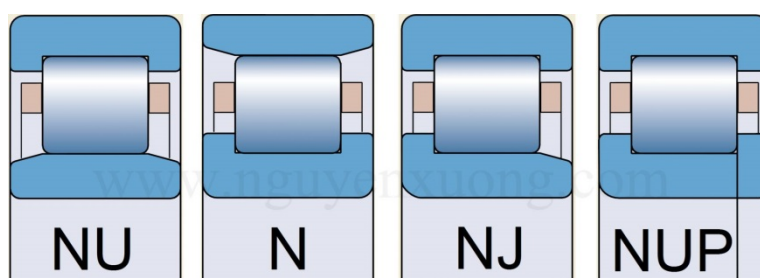


Fig. 1.4 - Esquema das diferentes tipologias de construção¹.

Os **rolamentos de rolos de agulha** têm uma capacidade elevada de carga e são especialmente utilizados quando o espaço radial disponível para o rolamento é pequeno. Normalmente não têm anel interno, sendo o próprio eixo a fazer de anel interno, para tal o eixo recebe previamente um temperamento especial. Como o próprio eixo substitui o anel interno,

¹ Disponível em: < <http://www.nguyenxuong.com/en.php?mod=product&id=skf-cylindrical-roller-bearings-crb-nguyen-xuong-95>>, Acedido em Fevereiro 2013.

este tipo de aplicação permite um deslocamento axial significativo, mas não permite desalinhamento angular do eixo [10].

Os **rolamentos de rolos cônicos** são particularmente úteis para combinar cargas axiais e radiais. Ambas as pistas deste rolamento assim como os rolos são cônicos. Quando sujeitamos este rolamento a uma carga radial é originada uma força axial, resultante do desenho cônico do rolamento, que é geralmente compensada usando outro rolamento cônico. O desenho mais usual deste tipo de rolamento prevê que este possa ser montado separadamente já que o anel interno em conjunto com os rolos são separados do anel externo [10].

Os **rolamentos autocompensadores de rolos** são formados pelo anel interno com duas pistas, anel externo com uma única pista esférica e os rolos com a superfície de rolagem esférica. Devido ao centro de pista esférica do anel externo ser coincidente com o centro do rolamento, permite o auto-alinhamento como nos rolamentos autocompensadores de esferas. Permitem o apoio da carga radial e de carga axial em ambos os sentidos. São adequados para aplicações com cargas pesadas e cargas de choque [9]. No que diz respeito aos rolamentos axiais ilustrados na Fig. 1.3, estes são subdivididos em dois grupos consoante o tipo de elemento rolante que utilizam, como já acontecia com os rolamentos radiais.

Os **rolamentos axiais de esferas** são constituídos por anéis em forma de coroa com uma pista onde as esferas rolam embutidas numa gaiola. Há configurações específicas deste tipo de rolamento que consoante o número de escoras permitem suportar carga axial apenas num sentido ou em ambos os sentidos [9].

Os **rolamentos axiais de rolos** são mais indicados para aplicações que exijam melhores comportamentos a cargas superiores, no caso dos axiais autocompensadores de rolos os elementos rolantes são colocados de forma oblíqua capacitando o rolamento de elevada carga axial e permitindo bons comportamentos em caso de desalinhamentos [9].

Além de todos os rolamentos que foram abordados até aqui existem outras configurações que são utilizadas em aplicações específicas com o intuito de as dotar com as características desejadas. Para o contexto em causa é importante saber que existem rolamentos em que os seus elementos rolantes são feitos de nitreto de silício permitindo diminuir o nível de vibrações, aumentar a velocidade de rotação, aumentar a durabilidade do rolamento assim como funcionar como isolante, devido às propriedades do nitreto de silício [10]. Outro tipo de configuração são os rolamentos isolados electricamente que permitem reduzir as correntes de circulação extremamente nefastas para a durabilidade do mesmo.

1.4 Requisitos de desenho

Em termos de projecto é necessário ter em atenção uma série de parâmetros importantes, apesar da dificuldade que existe em saber ao detalhe o tipo de aplicação que o motor vai integrar, convém projectá-lo tendo em conta os seguintes requisitos [11]:

- ∴ Dimensões: na maioria dos casos a potência de saída determina o tamanho do eixo, e conseqüentemente, o tamanho do eixo determina o diâmetro do furo do respectivo rolamento. Nos últimos anos, por forma a tornar os motores mais compactos, a tendência é reduzir a largura dos rolamentos.
- ∴ Cargas: com o intuito de escolher o melhor rolamento para uma determinada aplicação, todos os tipos de carga devem ser tidos em conta e não devemos ter em atenção apenas os pesos envolvidos e as forças que resultam da potência transmitida. Devemos entrar em linha de conta com forças magnéticas resultantes de assimetrias rotóricas, com forças que resultam de desequilíbrios e desalinhamento de cargas, assim como as forças que estão associadas aos sistemas de transmissão (e.g. caixa de velocidades, correia, etc).
- ∴ Velocidade: a velocidade de operação de um motor influencia a longevidade do rolamento e da respectiva lubrificação. Os motores de indução que usam conversores de frequência como accionamento requerem uma atenção especial aquando da selecção do tipo de rolamento, pois, além das velocidades de rotação que podem atingir, a comutação dos semicondutores provoca variações de tensão elevadas que contribuem para a degradação do rolamento.
- ∴ Eixo e chumaceira: devido à variação de temperatura a que os componentes do motor estão sujeitos é normal que ocorra dilatação e contracção do material, perante tal situação é habitual ter em conta o coeficiente de expansão e seleccionar rolamentos com alguma folga. Por vezes há necessidade de usar um rolamento que suporte movimentos axiais apenas devido ao comportamento termodinâmico descrito anteriormente.
- ∴ Montagem vertical: máquinas montadas verticalmente necessitam de considerações especiais, quer seja pelo facto dos rolamentos necessitarem de suportar forças axiais superiores assim como pelo facto de ser mais difícil de estabilizar a lubrificação.
- ∴ Ambiente: em locais sujos e com poeiras é habitual usar blindagens específicas para protecção dos rolamentos.
- ∴ Temperatura: para dimensionar ou projectar uma máquina é importante saber previamente a temperatura ambiente a que vai estar sujeita e a temperatura a que vai operar. Sabendo estes valores de temperatura torna-se mais assertiva a escolha do método de arrefecimento. A temperatura normal de operação de um motor eléctrico ronda valores entre 70 a 110 °C. Quando a diferença entre a temperatura

a que o motor opera e a temperatura ambiente é muito elevada é importante ter em conta a dilatação e contracção dos materiais e compensá-las escolhendo rolamentos com uma determinada folga e tolerância a movimentos axiais.

- ∴ Vibrações: em ambientes onde o motor fique sujeito a vibrações externas é recomendado usar rolamentos de esferas, de preferência pré-carregados para reduzir a sensibilidade às vibrações.
- ∴ Lubrificação: é um factor que tem influência directa na durabilidade do rolamento. A escolha a fazer entre massa lubrificante ou óleo lubrificante depende da temperatura de funcionamento da aplicação, da velocidade de rotação assim como da contaminação que possa surgir do meio envolvente. A massa é menos susceptível à contaminação exterior.

Tendo em conta todas as considerações feitas até agora, é importante ter consciência do tipo de motor mais adequado a uma determinada aplicação, das condições a que será sujeito ao longo do seu funcionamento e da manutenção que requererá.

2. AVARIAS EM ROLAMENTOS

Com o passar dos anos os rolamentos tornaram-se no elo mais fraco dos componentes constituintes do MIT, em parte devido à melhoria na construção do rotor e do estator que passaram a ser mais robustos e por outro lado porque os rolamentos são sujeitos a condições extremas de operação sem que exista alguma preocupação com isso. Por vezes funcionam indefinidamente em condições impróprias, ao ponto de serem substituídos sem que tenham atingido metade do seu tempo de vida útil e sem que se analisem as causas da falha, persistindo a real causa do problema. Posto isto, é importante estar consciente do tempo de vida do rolamento nas condições estabelecidas pelo fabricante para que se possa constatar se o comportamento do rolamento está de acordo com o pressuposto.

A vida de um rolamento é definida como o número de revoluções completas que o próprio pode realizar, ou como o número de horas em operação que o rolamento realiza a uma velocidade constante, antes de aparecer o primeiro sinal de fadiga. Contudo, testes laboratoriais provam que mesmo em condições idênticas de operação, rolamentos iguais têm diferentes tempos de vida [11].

2.1 Causas das avarias

Nos motores eléctricos os rolamentos podem falhar precocemente devido a diferentes razões. De entre todas elas destacam-se as seguintes: cargas superiores às suportáveis, lubrificação inadequada, cargas demasiado leves, estragos durante o transporte, manuseamento impróprio, problemas de montagem, erosão eléctrica, contaminação interna do rolamento, vedantes inadequados, ou folgas desadequadas, quer seja do lado da chumaceira ou do lado do veio [11]. Para que se possa prolongar a durabilidade de um rolamento é essencial identificar e eliminar o maior número de situações causadoras de avaria, a questão que se coloca é como chegar à conclusão sobre uma determinada causa. Segundo [12], é boa prática agrupar as situações stressantes a que os rolamentos estão sujeitos em diferentes tipos:

- i. Carga dinâmica e estática
- ii. Térmica
- iii. Vibração e choque
- iv. Ambiental
- v. Corrente eléctrica
- vi. Mecânica

Consoante o tipo de situação stressante com que o rolamento se depara, e após a sua caracterização, fica mais simples a descoberta da causa. No entanto deve-se ter em conta que se estas condições stressantes se mantiverem dentro dos limites aceitáveis definidos aquando do projecto/fabrico do rolamento, a falha prematura não deverá ocorrer [12].

Sob condições normais de operação, com cargas equilibradas e um bom alinhamento, a falha começa com a forma de pequenas fissuras localizadas abaixo da superfície da pista e dos elementos rolantes. Estas fissuras vão-se propagando gradualmente ao longo da superfície gerando vibrações perceptíveis e aumentando os níveis de ruído. Continuando nas mesmas condições de operação surge a fragmentação do material levando à ocorrência do fenómeno conhecido como *spalling* ou *flaking* (Fig. 2.1). Uma vez iniciada a degradação, a área afectada rapidamente se expande contaminando o lubrificante e provocando uma sobrecarga localizada sobre toda a pista do rolamento [13].

Apesar de este ser o processo normal da ocorrência da falha no rolamento, existem outras condicionantes que influenciam a ocorrência da mesma.

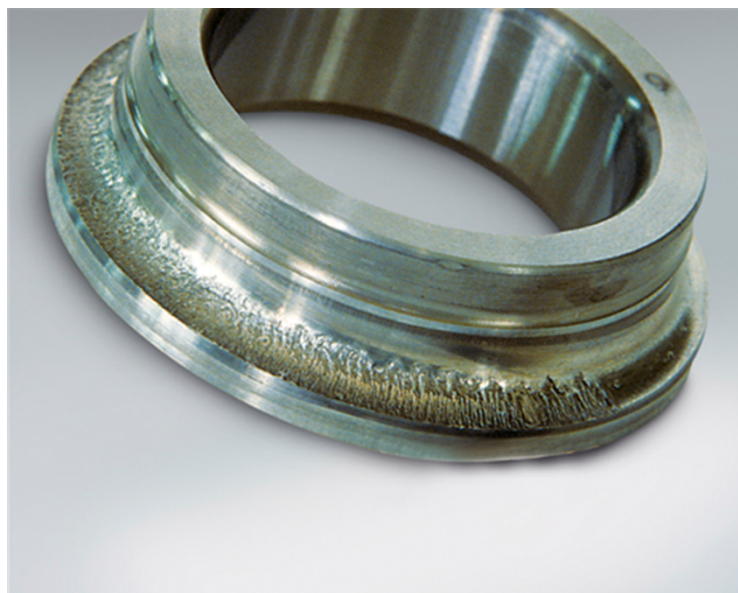


Fig. 2.1 - Fenómeno de *flaking* ou *spalling*².

Por vezes a causa da falha do rolamento surge imediatamente aquando do seu transporte ou da sua instalação no veio do motor, dado que o submetem a esforços e pressões desadequados. Quando aplicam esforços excessivos numa zona do rolamento que origina esforços dinâmicos entre os seus elementos constituintes é suficiente para causar danos ao longo das pistas sob a forma de *brinelling* e *false-brinelling*, o que leva à falha prematura do rolamento.

² Disponível em: <http://www.nskamericas.com/cps/rde/xchg/na_en/hs.xsl/flaking.html> Acedido em Março 2013.

Segundo [13], o fenómeno de *brinelling* é caracterizado pela formação de indentações localizadas nas pistas dos rolamentos exactamente onde o corpo rolante é pressionado entre as duas pistas. Na maioria das situações, a sua ocorrência é consequência da força aplicada aquando da montagem do rolamento. Esta força é aplicada no anel errado e é transmitida através dos elementos rolantes provocando uma deformação de origem estática. Enquanto este tipo de deformação raramente ocorre, o fenómeno de *false-brinelling* ocorre com maior frequência. Neste último, o rolamento é exposto a vibrações estáticas que podem surgir durante o transporte do motor ou do próprio rolamento originando indentações semelhantes às anteriores e com o aspecto que pode ser observado na Fig. 2.2.



Fig. 2.2 - Fenómeno de *false-brinelling*³.

Finalizada a instalação dos rolamentos existem depois problemas quando o veio é acoplado à carga, visto que se o alinhamento não for perfeito e a carga equilibrada sujeitamos novamente os rolamentos a tensões e vibrações elevadas que conduzem a uma redução do seu tempo de vida. Outro aspecto que devemos ter em consideração é, no caso de o veio do motor estar acoplado a uma correia, não usar uma tensão excessiva na correia porque causa esforços nos rolamentos e consequentes danos. Contrariamente a esta situação, existe o caso em que o motor roda sem qualquer tipo de carga e há elevada probabilidade de os rolamentos se danificarem

³ Disponível em: < http://www.nskamericas.com/cps/rde/xchg/na_en/hs.xsl/false-brinelling.html > Acedido em Março 2013.

devido a vibração excessiva. Uma forma de reduzir o risco desta ocorrência é usar rolamentos pré-carregados.

Outra causa importante de analisar é o tipo de lubrificação a que o rolamento é submetido ao longo do seu funcionamento, dado que é um factor preponderante e com influência directa na durabilidade do mesmo. A lubrificação imprópria engloba o excesso e a falta de lubrificação, pois em ambas as situações não estão reunidas as condições ideais de funcionamento e o sobreaquecimento do rolamento é uma consequência disso mesmo. Idealmente é suposto que todos os elementos rolantes estejam envolvidos numa fina película de óleo/massa permitindo que não haja contacto directo entre as superfícies de metal.

O método mais comum de lubrificação é a massa. Esta é usada amplamente em máquinas horizontais desde 1 hp até aos 500 hp, no caso de aplicações verticais é usual começar a usar rolamentos lubrificados a óleo a partir dos 150 hp devido à dificuldade que existe em manter o lubrificante nos locais que se pretende [12].

Em casos onde a película de lubrificação que envolve os elementos é demasiado fina, devido a baixos índices de viscosidade ou contaminação, as superfícies dos elementos metálicos deixam de estar sobre protecção e ocorre o contacto directo que por sua vez origina crateras microscópicas podendo evoluir para microlascas.

As avarias devido a contaminação são bastante comuns em ambientes industriais e manifestam-se maioritariamente sob a forma de indentações. Os agentes contaminadores são essencialmente provenientes do meio em que o motor se encontra e penetram nas pistas do rolamento devido a defeitos que possam surgir nos retentores, a partículas contidas no lubrificante que contaminem o meio aquando da relubrificação, a ligeiros defeitos na superfície do veio que possam soltar pequenos fragmentos de aço e devido a tarefas de manutenção levadas a cabo em condições não isentas de partículas contaminantes.

Estas situações descritas anteriormente são suficientes para que o rolamento atinja níveis de fadiga elevados e eventualmente *spalling*.

O problema das correntes que circulam através dos rolamentos é uma causa de avaria já conhecida desde o início do século passado. Em 1924, na referência [14], já são evidentes os problemas que este tipo de correntes causam e apesar das condições que lhes dão origem não serem exactamente as mesmas da actualidade é interessante perceber a relevância que este problema representa.

De facto, segundo [15], em todas as máquinas eléctricas rotativas se verifica a circulação de corrente eléctrica nos rolamentos, quer estas sejam de corrente contínua ou alternada, de pequena ou de grande potência. Isto acontece porque as máquinas não são perfeitas e como tal, existem

variações na largura do entreferro devidas à excentricidade que o rotor pode apresentar, a assimetrias do lado do estator, a materiais com diferentes permeabilidades ou outro tipo de assimetrias próprias do processo de construção. Todos estes detalhes de construção contribuem para que o campo magnético apresente alguma assimetria e consequentemente, apareçam tensões induzidas ao longo do veio do motor. Analogamente, distribuições assimétricas de corrente que surgem no rotor ou no estator, resultantes de defeitos vários (sistema de alimentação desequilibrado, curto-circuito entre espiras, barras do rotor fracturadas, etc.), também conduzem à distorção do campo magnético, originando as tensões induzidas anteriormente referidas [2].

Estas tensões induzidas no veio do motor originam uma corrente eléctrica que circula ao longo da carcaça do motor, passando pelos rolamentos e pelo veio do motor como é ilustrado na Fig. 2.3.

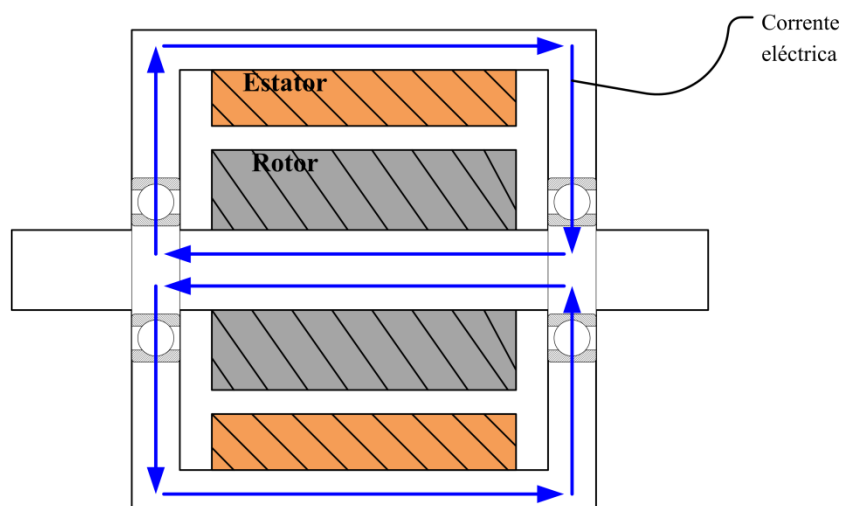


Fig. 2.3 - Circulação da corrente eléctrica no motor devido às tensões induzidas [2, 16].

A corrente que circula ao longo dos rolamentos dos motores eléctricos varia essencialmente em função da impedância dos rolamentos. Esta impedância é pequena quando o motor roda a uma velocidade baixa (inferior a 100 rpm) e aumenta à medida que a velocidade aumenta e deixa de haver contacto directo entre os elementos constituintes do rolamento. Em condições normais não há contacto entre os elementos rolantes do rolamento e os seus anéis adjacentes, sendo estes separados por um fino filme de óleo que contribui para o aumento da impedância e para a sua natureza predominantemente capacitiva. Assim sendo, este filme de óleo comporta-se como um condensador que é carregado através da diferença de potencial existente no veio, e quando a sua capacidade máxima é atingida liberta-se uma elevada e instantânea descarga de corrente eléctrica (electric discharge machining-EDM) [15, 17, 18].

Este fenómeno manifesta-se nas superfícies das pistas dos rolamentos sob a forma de crateras (*pitting*) e é tanto mais intenso quanto maior for a densidade de corrente eléctrica. De assinalar que esta medida exprime a corrente de descarga EDM em função da área da superfície de contacto entre a esfera e a pista do rolamento, sendo as unidades de densidade de corrente eléctrica expressas em (A/mm²) [15, 17, 19].

Contudo, recentemente, com o desenvolvimento da área dos accionamentos eléctricos em paralelo com os conversores de electrónica de potência e a sua utilização em motores de indução, este problema agravou-se. Como sabemos, os dispositivos variadores de frequência controlam a velocidade do motor convertendo a tensão sinusoidal da rede em tensão contínua e depois transformam a tensão contínua em tensão alternada através do inversor, sendo a frequência desta tensão determinada pelo controlo dos semicondutores. A frequência de comutação dos semicondutores é extremamente elevada (da ordem das dezenas de kHz) e origina elevados dv/dt que por sua vez, e em conjunto com a capacidade parasita formada entre o estator do motor e o rotor, criam uma tensão induzida no veio do motor. Mais uma vez acontece que se esta tensão for suficientemente elevada podem surgir correntes ao longo dos rolamentos [4].

Os inversores geram ainda uma tensão de modo comum que resulta da soma das três tensões de saída do inversor ser diferente de zero. Assim sendo, em contraste com os tradicionais efeitos electromagnéticos encontrados enquanto a máquina é alimentada directamente por uma fonte alternada sinusoidal, os inversores excitam um efeito electrostático capacitivo de acoplamento entre o rotor e o estator, criando um potencial elevado entre o veio e a terra.

2.2 Técnicas de mitigação e acções correctivas

No que à fadiga normal do rolamento diz respeito, não há grandes acções correctivas ou técnicas que possam ser aplicadas de forma a que se possa prolongar a vida do rolamento. Obviamente que uma manutenção feita de acordo com as indicações do fabricante, com intervalos de relubrificação adequados e respeitando as compatibilidades que as massas apresentam pode atrasar o processo de fadiga do rolamento.

Já no caso das avarias causadas pela instalação imprópria ou por vibrações estáticas decorrentes do processo de transporte é habitual corrigirem-se mantendo o rotor fixo em situações de transporte, evitando oscilações bruscas, e no caso de existirem vibrações decorrentes do tipo de carga a que o motor está acoplado, a solução passa por verificar o alinhamento da carga e se estiver tudo correcto podem ser utilizados rolamentos pré-carregados que anulam as vibrações consequentes de uma carga demasiado leve. No caso da substituição de rolamentos é imperativo que aquando da montagem do novo rolamento se faça pressão no anel

correcto, para que os elementos rolantes não sejam indevidamente pressionados e surjam indentações nas pistas adjacentes.

Quando a causa está relacionada com contaminação ou lubrificação imprópria é importante que se tenha em atenção o ambiente envolvente do motor, que se tenham hábitos de manutenção e se criem ambientes isentos de partículas contaminantes. Também é importante ter em atenção se as barreiras às partículas contaminantes, como é o caso dos retentores, estão aptos. No caso da lubrificação, além do que foi dito anteriormente, é necessário ter em atenção que existe um nível óptimo, sabendo que se este nível for ultrapassado pode provocar aquecimento excessivo do rolamento e consequente avaria, mas caso seja insuficiente pode gripar o rolamento.

As técnicas de mitigação das correntes que percorrem os rolamentos são diversas e têm surgido sucessivamente ao longo dos tempos como forma de resposta às novas situações que ocorrem. O paradigma actual, que se baseia na alimentação de motores através de variadores de frequência com elevadas frequências de comutação, inviabiliza algumas das técnicas que vêm sendo usados há anos com resultados razoáveis. Os rolamentos isolados constituem uma técnica de mitigação de correntes que é usada em motores dc e em motores de grande potência, e apresentam bons resultados quando essa corrente é provocada por distribuições assimétricas de fluxo [17, 19]. Ao isolar um rolamento o circuito é interrompido e a corrente de circulação deixa de existir.

Com o aparecimento dos dispositivos baseados em IGBTs surgem elevados dv/dt que em conjunto com as capacidades parasitas originam correntes de circulação no veio do motor. Tais correntes ocorrem em ambos os rolamentos e como tal se queremos utilizar rolamentos isolados para mitigar as correntes é obrigatório que se usem rolamentos isolados dos dois lados (*drive-end* e *nondrive-end*). Se só utilizarmos um rolamento isolado o outro será sujeito a toda a corrente de descarga, danificando-se mais rapidamente. Contudo, devido às altas frequências, a camada fina que isola os rolamentos pode não ser suficiente para evitar os estragos por EDM sendo por vezes necessário recorrer a rolamentos híbridos com esferas de cerâmica que permitem um isolamento eléctrico mais eficiente [19].

As técnicas de ligação à terra são outra forma de mitigar as correntes de circulação através da equipotencialidade dos diferentes elementos. O problema actual com que nos deparamos é que a maioria das normas e boas práticas de aterramento apenas resultam para valores de frequência relativamente baixos quando comparados com as frequências que encontramos num circuito alimentado por um conversor de frequência. Por isto mesmo é necessário proceder à implementação de técnicas específicas que garantam bons resultados nestes casos.

Uma das técnicas usadas passa por utilizar um contacto eléctrico entre o veio e a terra através de um circuito de baixa impedância, sendo esse contacto conseguido através da utilização de escovas. É implementado externamente ao motor, necessita de algum espaço para que a sua instalação seja possível e é relativamente barato de implementar. Infelizmente este método partilha as desvantagens típicas dos sistemas que incorporam escovas: desgaste rápido, limitação da velocidade de rotação e o aumento gradual da impedância de contacto.

Segundo [19], é possível reduzir o valor de pico da tensão ao longo do veio do motor de 5-8 V para valores na ordem dos 20-40 mV, sendo isto válido para velocidades de rotação do motor da ordem das 4000 rpm. Convém apontar que após dois dias de funcionamento contínuo os valores de pico da tensão aumentam ligeiramente e fixam-se no intervalo de 1-2 V.

Existem também massas lubrificantes com índices de condutividade superior de forma a diminuir a impedância que existe ao longo da fina película que se forma entre a pista do rolamento e os seus corpos rolantes, diminuindo desta forma o efeito capacitivo que está na origem do EDM.

Outro tipo de técnicas estão relacionadas com o design do próprio motor, como é o caso da situação em que é utilizado um escudo ou barreira electrostática entre o estator e o rotor do motor provocando um efeito semelhante à gaiola de Faraday e consequentemente anulando o efeito capacitivo entre o rotor e o estator, que para efeitos práticos resulta na eliminação das correntes que circulam ao longo do veio do motor. O espaço limitado do entreferro que separa o estator do rotor é por vezes um factor impeditivo da aplicação desta barreira.

No que diz respeito à configuração dos inversores já foram utilizadas várias técnicas, desde a alteração da frequência da onda portadora, à alteração da tensão do sistema. No primeiro caso, constatou-se uma diminuição no número de vezes em que o rolamento era sujeito a uma EDM, prolongando-se assim a sua vida. No segundo caso, a amplitude das correntes de descarga diminuiu [19].

Por último, falta referir a utilização de filtros R-L-C na saída do inversor com o objectivo de reduzir a onda de tensão reflectida e diminuir as descargas de corrente a que os rolamentos ficam sujeitos. O dimensionamento deste tipo de filtros deve ser feito com extremo cuidado e adaptado a cada situação porque podem surgir situações de ressonância que pioram o problema.

Na Tabela 2.1 são sintetizadas algumas das técnicas de mitigação mais utilizadas na actualidade e as respectivas vantagens e desvantagens que podem surgir da sua aplicação.

Tabela 2.1 - Prós e contras de algumas técnicas de mitigação [19].

Tipo de técnica	Prós	Contras
Rolamentos isolados	-Facilidade de aplicação em casos de readaptação	-Não protege directamente as cargas que possam estar acopladas
Ligação do veio à terra através de escovas	-Facilidade de implementação	-Limitação da velocidade de operação -Manutenção elevada -Problemas de readaptação do sistema
Massa condutora	-Baixo custo e facilidade de aplicação	-Pouca duração -Pouca eficácia a altas velocidades
Escudo electrostático	-Modificação permanente e duradoura	-Difícil e dispendioso realizar esta alteração
Redução da tensão do inversor	-Solução comum para outras questões relacionadas com os IGBT	-O inversor tem que suportar correntes superiores para a mesma potência -Atenua mas não elimina o problema
Filtro R-L-C de saída do inversor	-Solução comum para outras questões relacionadas com os IGBT	-Custo e espaço necessário -Reduz, mas não elimina o problema

3. MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO

Desde sempre que a Humanidade, quando se depara com um problema ou com o funcionamento anómalo de algo, tenta encontrar uma causa para o justificar, tenta classificar esse problema e finalmente tenta resolvê-lo ou arranjar um conjunto de procedimentos a seguir.

No âmbito deste trabalho os procedimentos são idênticos. Existe uma primeira fase de monitorização e aplicação de técnicas de diagnóstico que nos permitem despistar que tipo de problema existe, posteriormente analisa-se a causa desse problema com o objectivo de a eliminar e por último seguem-se os procedimentos adequados para que tudo volte à normalidade.

A evolução das técnicas de diagnóstico nesta área foi evidente, basta reparar que antigamente todo o diagnóstico se baseava nos limitados sentidos humanos, como é o caso da audição e da visão que permitiam, com um elevado grau de subjectividade, aferir o estado da máquina. Hoje em dia são vários os métodos que temos à nossa disponibilidade, uns com melhores resultados que outros, mas de qualquer forma temos a possibilidade de escolher o que se adapta melhor à circunstância.

Na generalidade das situações queremos proceder à monitorização e ao diagnóstico da máquina sem interromper o funcionamento da mesma, isto só é possível se forem utilizados métodos de diagnóstico não invasivos, que baseiam a sua análise na recolha de grandezas eléctricas ou mecânicas obtidas através de sensores. Contudo, os métodos utilizados em muitas situações ainda continuam a ser aqueles em que é necessário parar a máquina, inspeccionar as suas partes mecânicas, analisar os compostos presentes no lubrificante, entre outras situações também elas invasivas. De seguida são apresentados alguns dos métodos mais utilizados para diagnosticar avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos.

3.1 Análise das vibrações mecânicas

A análise de vibrações a par da análise do ruído são ainda hoje as técnicas a que podemos recorrer quando só temos disponíveis os nossos sentidos para fazer uma análise rudimentar e pouco preventiva da avaria. Felizmente esta técnica sofreu avanços significativos e hoje em dia existem muitos sistemas no mercado que se baseiam nela para fazer uma análise preventiva da avaria. A maioria destes sistemas tem por base um sensor que mede as vibrações e fornece um sinal eléctrico proporcional ao nível de vibração. Este sensor tem que ser instalado num local próximo da origem das vibrações e este factor é bastante limitativo porque requer que sejam pessoas especializadas a fazê-lo e requer que façam alterações à estrutura original da máquina.

Os sinais vibratórios são usualmente adquiridos e comparados com sinais de referência para que se possam tirar conclusões acerca do estado dos rolamentos. Os métodos usados geralmente para analisar estes sinais são baseados na análise no domínio do tempo, análise probabilística e análise no domínio da frequência. Esta última é a mais utilizada provavelmente porque a Transformada de Fourier é uma técnica simples de usar e também pelo facto das frequências características de vibração serem melhor identificáveis no domínio da frequência [20].

As frequências características de vibração são frequências específicas que permitem identificar que elemento do rolamento está danificado. Por exemplo, quando existe um defeito no anel externo e o elemento rolante entra em contacto com esse defeito é gerado um impacto que afecta a estrutura do rolamento e toda a estrutura que o suporta. Como consequência o sinal vibratório adquirido capta esse padrão de frequências. As frequências características de vibração vêm em função da geometria do rolamento⁴ e da frequência mecânica do rotor f_r [21]:

$$f_{bor} = \frac{N_{cr}}{2} \times f_r \times \left(1 - \frac{D_{cr}}{D_p} \times \cos \beta \right) \quad (3.1)$$

$$f_{bir} = \frac{N_{cr}}{2} \times f_r \times \left(1 + \frac{D_{cr}}{D_p} \times \cos \beta \right) \quad (3.2)$$

$$f_{bs} = \frac{D_p}{2 \times D_{cr}} \times f_r \times \left(1 - \left(\frac{D_{cr}}{D_p} \right)^2 \times \cos^2 \beta \right), \quad (3.3)$$

onde:

f_{bor} frequência característica de vibração do anel externo (Hz);

f_{bir} frequência característica de vibração do anel interno (Hz);

f_{bs} frequência característica de vibração dos corpos rolantes (Hz);

f_r frequência mecânica do rotor (Hz);

D_p diâmetro primitivo (mm);

D_{cr} diâmetro do corpo rolante (mm);

N_{cr} número de corpos rolantes;

β ângulo de contacto (graus).

⁴ É importante ter presente a Fig. 1.2 - Dimensões e elementos constituintes de um rolamento fixo de esferas.

De facto, esta técnica é bastante reconhecida na indústria tendo inclusivamente um conjunto de normas técnicas publicadas pela Organização Internacional de Normalização, como é o caso da ISO 10816 [22, 23], que permitem avaliar a severidade da vibração.

Contudo, além da desvantagem de aplicação referida anteriormente, a maior desvantagem é o custo elevado [24, 25].

3.2 Análise físico-química do lubrificante

É uma técnica utilizada em várias áreas da engenharia, amplamente utilizada no diagnóstico de transformadores eléctricos e também utilizada, quando possível, nos motores eléctricos. Consiste na análise química dos componentes que são libertados no óleo enquanto o motor está em funcionamento. Por um lado, esta técnica permite analisar se o lubrificante foi sujeito a temperaturas excessivas através da presença de produtos químicos que podem surgir no estado sólido, líquido ou gasoso e, por outro lado, permite analisar pequenas partículas libertadas pelos rolamentos durante o seu funcionamento. Assim sendo, o lubrificante pode conter aspectos indicativos da sua própria degradação como também pode conter partículas indicativas da degradação do próprio rolamento. Contudo, é um tipo de análise um pouco limitativa já que só em motores de elevada potência (acima dos 50 kW), com rolamentos lubrificados a óleo, é vulgarmente utilizada. Nos motores de pequena e média dimensão, em que é utilizada massa lubrificante, este tipo de análise química não é utilizada [24]. Por outro lado, e apesar de ser um método invasivo, continua-se a inspeccionar a existência de partículas físicas libertadas, no lubrificante, pelo rolamento.

3.3 Análise da temperatura

Com o desenvolvimento da termografia, em paralelo com o desenvolvimento das câmaras termográficas, este tipo de análise tornou-se num dos métodos principais na análise de instalações eléctricas onde possam existir defeitos de isolamento ou de mau contacto entre componentes da instalação. É um parâmetro a ter em conta em todos os sistemas porque além do possível risco de incêndio, é quase sempre indicativo da redução do rendimento do sistema.

No caso dos rolamentos, a temperatura pode exprimir um aumento da fricção entre os constituintes do rolamento (devido a avaria), uma velocidade de operação superior à velocidade limite imposta pelo fabricante, uma lubrificação deficiente ou pode exprimir outros factores que não estejam directamente relacionados com o rolamento, mas que façam aumentar a temperatura deste. A desvantagem mais limitativa deste tipo de análise é a detecção da fonte de calor, ou seja,

quando obtemos uma imagem térmica ou um sinal de temperatura da superfície do motor é complicado isolar eficazmente a fonte do problema [24].

3.4 Análise espectral da corrente estatórica de alimentação do motor

Uma das técnicas de diagnóstico aplicadas a máquinas trifásicas assenta na análise no domínio da frequência das corrente do estator [7, 26]. Esta técnica de análise é conhecida no meio científico como MCSA (*motor current signature analysis*), sendo bastante utilizada devido ao facto de ser uma técnica não invasiva, que não requer a alteração física da máquina e em que apenas é necessário ter acesso às suas correntes eléctricas.

No que à análise de avarias em rolamentos diz respeito, é possível relacionar as frequências características atrás referidas⁵ com as frequências que aparecem no espectrograma da corrente. Se percebermos que qualquer defeito que o rolamento tenha provocará um movimento radial do rotor relativamente ao estator da máquina e consequentemente uma variação excêntrica no entreferro que, segundo [27], gera componentes espectrais no espectrograma da corrente do estator às frequências do motor f_{bng} , relacionadas com as frequências características de vibração e com a frequência de alimentação do motor através de:

$$f_{bng} = |f_s \pm k \times f_n|, \quad (3.4)$$

onde:

- f_s frequência de alimentação (Hz);
- k número inteiro igual a 1, 2, 3...
- f_n frequência característica de vibração (Hz).

Apesar de este ser um dos métodos mais eficaz para diagnosticar avarias, tem algumas particularidades que devem ser tidas em conta para que obtenhamos os resultados desejados. A aquisição das correntes deve ser feita quando a máquina atinge o regime permanente. A variação da velocidade durante o processo de amostragem da corrente invalida os dados adquiridos. Deve-se ter em conta a resolução espectral para que se consiga isolar as frequências que caracterizam a avaria sem as confundir com outros harmónicos próprios de assimetrias do sistema. Deve-se ainda ter em atenção que o nível de carga do motor influencia a amplitude de algumas componentes espectrais no espectrograma da corrente [13, 20, 28].

⁵ Frequências características de vibração abordadas no ponto 3.1

3.5 Análise EPVA (Extended Park's Vector Approach)

Esta técnica, também designada de Componente Alternada do Módulo do Vector de Park da corrente estatórica, foi uma forma encontrada para discriminar a informação contida no módulo do Vector de Park da corrente eléctrica e resulta da análise espectral da sua componente alternada. Como é sugerido em [29], o facto de ser baseada nas três correntes de alimentação do motor, torna-a numa técnica com um espectro mais significativo que o obtido pela análise espectral convencional da corrente.

A aplicação desta técnica no diagnóstico de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos baseia-se nas equações e manipulações apresentadas de seguida [2, 29-31]:

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) \times i_A - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) \times i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) \times i_C \quad (3.5)$$

$$i_Q = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \times i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \times i_C, \quad (3.6)$$

onde i_D e i_Q representam as componentes do Vector de Park da corrente eléctrica, expressas em função das correntes de alimentação do motor i_A , i_B e i_C .

Em situação normal de funcionamento, sem qualquer tipo de varia, as componentes do Vector de Park da corrente eléctrica serão dadas por:

$$i_D = \sqrt{\frac{3}{2}} \times I_M \cos(\omega_s t) \quad (3.7)$$

$$i_Q = \sqrt{\frac{3}{2}} \times I_M \sin(\omega_s t), \quad (3.8)$$

onde:

I_M amplitude da corrente eléctrica de alimentação do motor (A);

ω_s frequência angular do sistema de alimentação (rad/s);

t tempo (s).

As equações (3.7) e (3.8) são representativas das equações paramétricas de uma circunferência centrada na origem do referencial, como tal nesta situação o módulo do Vector de Park da corrente eléctrica é constante. No caso de existirem avarias nos rolamentos isso irá

reflectir-se no espectrograma da corrente absorvida pelo motor, como já foi referido previamente, nas frequências específicas $|f_s + k \times f_n|$ e $|f_s - k \times f_n|$ derivadas da equação (3.4).

Então considerando essas avarias, as correntes eléctricas das três fases de alimentação do motor representam-se pelas seguintes expressões:

$$i_A = I_f \cos(\omega_s t - \alpha) + I_{dl} \cos(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l) + I_{dr} \cos(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r) \quad (3.9)$$

$$i_B = I_f \cos(\omega_s t - \alpha - 2\pi/3) + I_{dl} \cos(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l - 2\pi/3) + I_{dr} \cos(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r - 2\pi/3) \quad (3.10)$$

$$i_C = I_f \cos(\omega_s t - \alpha + 2\pi/3) + I_{dl} \cos(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l + 2\pi/3) + I_{dr} \cos(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r + 2\pi/3) \quad (3.11)$$

onde:

I_f amplitude do termo fundamental da corrente eléctrica de alimentação do motor, com avaria no rolamento (A);

I_{dl} amplitude da componente espectral da corrente eléctrica absorvida pelo motor associada à frequência $|f_s - k \times f_n|$ (A);

I_{dr} amplitude da componente espectral da corrente eléctrica absorvida pelo motor associada à frequência $|f_s + k \times f_n|$ (A);

α fase inicial do termo fundamental da corrente eléctrica de alimentação do motor (rad);

β_l fase inicial da componente espectral da corrente eléctrica de alimentação do motor associada à frequência $|f_s - k \times f_n|$ (rad);

β_r fase inicial da componente espectral da corrente eléctrica de alimentação do motor associada à frequência $|f_s + k \times f_n|$ (rad);

ω_n frequência angular natural (rad/s).

Posto isto, e substituindo nas equações (3.5) e (3.6) as correntes de alimentação do motor deduzidas no passo anterior, as componentes do Vector de Park da corrente eléctrica vêm dadas por:

$$i_D = \sqrt{\frac{3}{2}} \left(I_f \cos(\omega_s t - \alpha) + I_{dl} \cos[\omega_s t - \omega_n t - \beta_l] + I_{dr} \cos[\omega_s t + \omega_n t - \beta_r] \right) \quad (3.12)$$

$$i_Q = \sqrt{\frac{3}{2}} \left(I_f \sin(\omega_s t - \alpha) + I_{dl} \sin[\omega_s t - \omega_n t - \beta_l] + I_{dr} \sin[\omega_s t + \omega_n t - \beta_r] \right). \quad (3.13)$$

Nestas condições, o módulo do Vector de Park da corrente eléctrica que alimenta o motor vem dado por:

$$\begin{aligned} |i_D + ji_Q|^2 = & \frac{3}{2} (I_f^2 + I_{dl}^2 + I_{dr}^2) + 3I_f I_{dl} \cos(\omega_n t - \alpha + \beta_l) + \\ & + 3I_f I_{dr} \cos(\omega_n t + \alpha - \beta_r) + 3I_{dl} I_{dr} \cos(2\omega_n t - \beta_r + \beta_l) \end{aligned} \quad (3.14)$$

A expressão anterior é referente ao quadrado do módulo do Vector de Park da corrente eléctrica e pode-se identificar um termo constante dominante, cuja amplitude é determinada pela componente fundamental da corrente eléctrica de alimentação do motor, assim como também pelas componentes espectrais que estão associadas à avaria. Os outros dois termos que estão associados à frequência f_n , cujas amplitudes são o resultado do produto da amplitude do termo fundamental da corrente eléctrica pela amplitude de cada uma das componentes espectrais associadas à avaria. O último termo está associado a uma frequência de $2 \times f_n$, cuja amplitude apenas depende do produto das amplitudes das componentes espectrais da corrente eléctrica associadas à avaria. Tendo em conta que estas últimas têm uma amplitude bastante inferior à do termo fundamental da corrente eléctrica absorvida pelo motor, no caso de existir avaria no rolamento, o espectrograma do módulo do Vector de Park da corrente eléctrica conterá um termo contínuo dominante e uma componente espectral à frequência f_n . Conterá ainda uma componente espectral à frequência $2 \times f_n$, embora esta última tenha uma amplitude reduzida quando comparada com as outras [2].

4. PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1 Preparação dos rolamentos com avarias

Com o intuito de estudar várias situações que estão relatadas na bibliografia e que são frequentes no mundo industrial, foram preparados diferentes rolamentos com avarias diversas para que no final se possam tirar conclusões interessantes para o futuro, à semelhança do que foi feito em [5, 20, 32]. É importante perceber que estas avarias foram provocadas através de um processo *offline* e que foram criteriosamente feitas de forma a simular situações reais de avaria de rolamentos em motores de indução trifásicos. Para que tal fosse possível foi necessário ter acesso a conhecimento existente, algum descrito ao longo do Capítulo 2, que permitiu saber a evolução de uma determinada avaria, a causa que a origina e a forma/padrão que a caracteriza. O motor utilizado nos testes vem equipado de origem com dois rolamentos: do lado do ataque (*drive-end*) é utilizado um rolamento 6206 ZZ e do lado do ventilador (*nondrive-end*) é utilizado um rolamento 6205 ZZ. Ambos os rolamentos são do tipo radial fixos de esferas e têm as características geométricas incluídas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Dimensões dos rolamentos [9, 33].

Dimensões ⁶	6205 ZZ	6206 ZZ
Diâmetro externo (mm)	52	62
Diâmetro do furo (mm)	25	30
Largura (mm)	15	16
Nº de corpos rolantes	9	9
Diâmetro do corpo rolante (mm)	7.938	9.525
Diâmetro primitivo (mm)	13.5	16

Posto isto, a metodologia adoptada para proceder às avarias foi de encontro ao tipo de avarias abordadas no Capítulo 2 desta dissertação.

No caso do tipo de avaria que surge naturalmente com a fadiga normal do material (*flaking* ou *spalling*) o padrão de falha começa por ser o de uma fissura abaixo da superfície da pista que vai alastrando e degradando com a continuação das situações de stress. De forma a simular esta

⁶ A Fig. 1.2 identifica a nomenclatura aqui utilizada.

falha e aproximar ao máximo a situação experimental da real foi feito um único furo numa das pistas do rolamento. Obviamente que não foi analisada uma única situação isolada, mas foram preparadas várias situações experimentais que se distinguem entre si devido ao diâmetro com que o furo foi realizado e devido ao anel em que o mesmo foi realizado.



Fig. 4.1 - Rolamentos perfurados num único ponto, quer no anel interno quer no anel externo.

A Fig. 4.1 além de ser ilustrativa das situações experimentais executadas com o objectivo de simular o fenómeno de *flaking* ou *spalling* também ilustra as situações que foram utilizadas para simular a avaria designada por *pitting* (crateras). Como já foi referido no Capítulo 2, esta avaria caracteriza-se pela formação de crateras ao longo da superfície das pistas dos rolamentos, e é provocada por EDM.

Estas avarias têm algum grau de subjectividade quanto ao local exacto de ocorrência (ao longo do rolamento), e além disso têm diferentes estágios de degradação. Como tal, realizaram-se avarias em que o furo realizado tinha diâmetros diferentes para simular diferentes estágios da avaria, e para além disso utilizou-se alternadamente a pista interna e a pista externa para introduzir as avarias.

Ao longo da pesquisa efectuada, incluindo os trabalhos referenciados no início do capítulo, verificou-se que os autores direccionam o seu estudo no sentido das avarias que ocorrem ao longo das pistas dos rolamentos, provavelmente porque a falha começará por aí. Contudo, e no sentido de despistar outras situações, efectuiu-se um defeito numa das esferas do rolamento, pois a esfera é também um elemento que está sujeito à ocorrência de EDM ou à fadiga natural do material, podendo apresentar os mesmos defeitos que a pista apresenta (Fig. 4.2).



Fig. 4.2 - Defeito provocado nas esferas.

Outra situação que acontece com bastante frequência é a avaria designada por *false-brinelling*, que é caracterizada por vibrações estáticas decorrentes do processo de transporte e tem um padrão característico que reflecte pequenas indentações nas pistas do rolamento com o mesmo passo que as esferas apresentam ao longo da gaiola que as contém. Esta situação foi simulada furando o anel do rolamento em todo o seu perímetro e com o mesmo espaçamento que as esferas apresentam na gaiola que as contém. Usaram-se novamente diferentes diâmetros nos furos realizados para conseguir simular os diferentes estágios da avaria. A Fig. 4.3 ilustra a situação relatada.



Fig. 4.3 - Rolamentos perfurados ao longo de todo o perímetro do anel externo com furos de 5 e de 2 mm.

Finalmente procedeu-se à indentação do anel externo de um rolamento com o objectivo de modelar situações em que o rolamento seria percorrido por correntes de alta frequência, consequência da alimentação do motor ser feita por um conversor de frequência. A Fig. 4.4 ilustra o trabalho que foi realizado para que a simulação da avaria fosse possível.



Fig. 4.4 - Rolamento cónico com estrias no anel externo.

Estando descritas todas as situações práticas utilizadas para simular as ocorrências de avarias mais comuns em motores de indução trifásicos, procedeu-se de seguida à descrição da montagem laboratorial.

4.2 Descrição da montagem laboratorial

A montagem laboratorial é essencialmente constituída pelo motor de indução trifásico (Tabela 4.2) onde foram introduzidas as avarias. Este motor é alimentado através de um autotransformador e está acoplado a uma máquina de indução de 7.5 kW alimentada por um conversor de frequência⁷ que permite variar a carga a que o motor do ensaio é sujeito. Resta referir que a aquisição de dados foi efectuada com base numa plataforma dSpace ds1103 que adquiriu os dados das tensões simples e das correntes de linha que alimentavam o motor.

Tabela 4.2 - Características nominais do motor de indução trifásico (estipuladas pelo fabricante).

Marca	WEG
Tensão	380/660 V (Δ/Y)
Corrente eléctrica	6.26/3.6 A (Δ/Y)
Frequência	50 Hz
Potência	3 kW
Número de pólos	4
Rendimento	83 %
Velocidade Angular	1440.03 rpm
Factor de potência nominal	0.83
Binário electromagnético	19.91 Nm
Momento de inércia do motor	0.012 Kg.m ²

O esquema da montagem laboratorial descrita anteriormente é apresentado na Fig. 4.5.

É importante assinalar que para realizar o caso A o motor teste deixou de ser alimentado pelo autotransformador e foi alimentado pelo conversor de frequência, como tal a montagem da Fig. 4.5 só não ilustra esta situação.

⁷ WEG CFW-09 com uma estratégia de controlo baseada em controlo vectorial.

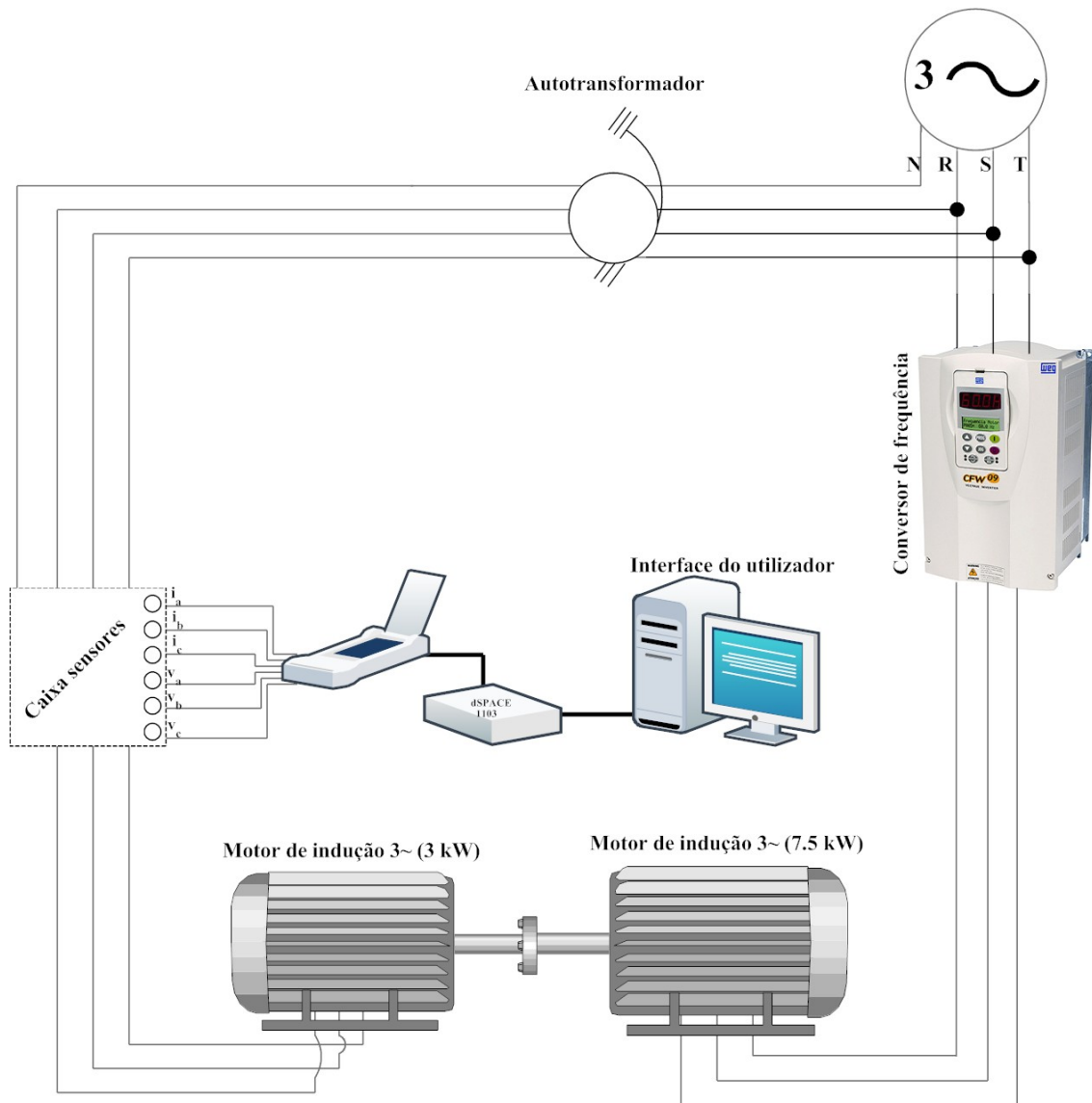


Fig. 4.5 - Esquema representativo da montagem laboratorial que serviu para realizar os vários ensaios experimentais.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Situações de avaria testadas

Os resultados a seguir apresentados foram obtidos com base na montagem laboratorial descrita anteriormente e submetendo o motor a situações de avaria que simulam a realidade. Os ensaios foram efectuados com os enrolamentos estatóricos do motor ligados em triângulo, com um sistema trifásico de tensões equilibrado, com frequência de 50 Hz e um valor eficaz de 380 V.

Antes de proceder a qualquer tipo de análise é importante caracterizar e enumerar os casos de avarias simuladas que serão alvo de estudo. A Tabela 5.1 caracteriza todos esses casos.

Tabela 5.1 - Caracterização e numeração das avarias analisadas.

Caso	Tipo de avaria introduzida	N (rpm)
1	1 furo 2 (mm) anel externo DE	1500;1446
2	1 furo 4 (mm) anel externo DE	1500;1446
3	1 furo 2 (mm) anel interno DE	1500;1446
4	1 furo 4 (mm) anel interno DE	1500;1446
5	1 furo 2 (mm) anel externo NDE	1500;1446
6	1 furo 4 (mm) anel externo NDE	1500;1446
7	1 furo 2 (mm) anel interno NDE	1500;1446
8	1 furo 4 (mm) anel interno NDE	1500;1446
A	1 furo 4 (mm) anel externo DE com o motor alimentado pelo conversor de frequência	1500
B	9 furos 5 (mm) anel externo DE (false-brinelling)	1500;1446
C	Defeito numa esfera DE	1500;1446
D	Estrias no anel externo DE	1500;1446

Como se pode concluir pela Tabela 5.1 foram realizados ensaios em que para cada tipo de avaria eram testados vários níveis de carga do motor: a 1500 rpm (vazio) e próximo da carga nominal (1446 rpm). Foram usados dois métodos de diagnóstico distintos: a análise espectral da corrente eléctrica estatórica e EPVA.

5.2 Análise espectral da corrente estatórica

Como já foi referido no Capítulo 3, este tipo de análise é realizada no diagnóstico de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos porque o espectrograma da corrente eléctrica espelha as variações do entreferro decorrentes das avarias presentes nos rolamentos. De uma forma resumida o que será feito na análise posterior é a identificação das frequências características de avaria, que são calculadas com base nas frequências características de vibração ((3.1)-(3.3)) e são relacionadas com o espectrograma da corrente eléctrica através de (3.4).

Para o cálculo das frequências características de vibração de cada elemento do rolamento é necessário saber as características dos rolamentos (Tabela 4.1) e a velocidade de rotação do veio para os diferentes níveis de carga do motor.

Tabela 5.2 - Frequências características de vibração do anel externo (f_{bor}) e anel interno (f_{bir}) de ambos os rolamentos (DE e NDE) e para dois níveis de carga diferentes.

rpm	6206 anel externo	6206 anel interno	6205 anel externo	6205 anel interno
1500	89.21 Hz	135.79 Hz	89.31 Hz	135.69 Hz
1446	85.99 Hz	130.91 Hz	86.09 Hz	130.81 Hz

As figuras de seguida apresentadas são sempre relativas a situações comparativas entre o espectrograma da corrente eléctrica da situação sem avaria com o espectrograma da corrente eléctrica da situação com avaria. Tendo em conta que a avaria ocorre nos rolamentos as correntes eléctricas das três fases terão o mesmo conteúdo espectral sendo necessário analisar apenas uma delas.

Inicialmente serão analisadas situações de avaria em que o defeito surge num único ponto.

Caso 1

Para este caso, conjugando a frequência de alimentação do motor f_s com a frequência característica de vibração f_{bor} , correspondente à velocidade em causa e ao elemento onde foi provocada a avaria (anel externo), é possível identificar as frequências que caracterizam a avaria. A Equação (3.4), através da atribuição de diferentes valores de k permite encontrar várias frequências no espectrograma da corrente eléctrica.

Tabela 5.3 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente eléctrica estatórica e respectiva amplitude (caso 1).

Figura	Velocidade (rpm)	k	f_{bng} (Hz)	$\Delta Amp.$ (dB)
Fig. 5.1 e Fig. 5.2	1500	2	128.41	14.9
		2	228.41	4.7
		4	406.82	5.7
Fig. 5.3 e Fig. 5.4	1446	2	121.99	5
		2	221.99	4.8
		4	393.98	3.7

A Tabela 5.3 contempla informação variada correspondente à mesma avaria, mas a duas velocidades distintas de rotação do motor. Por um lado, contém a frequência f_{bng} obtida directamente das fórmulas⁸ e por outro lado, apresenta, para cada frequência de avaria, a correspondente diferença entre a amplitude das componentes espectrais características da avaria e a amplitude das componentes à mesma frequência presentes no espectrograma sem avaria ($\Delta Amp.$ (dB)). Além disso, faz referência à figura que contém os espectrogramas para cada caso.

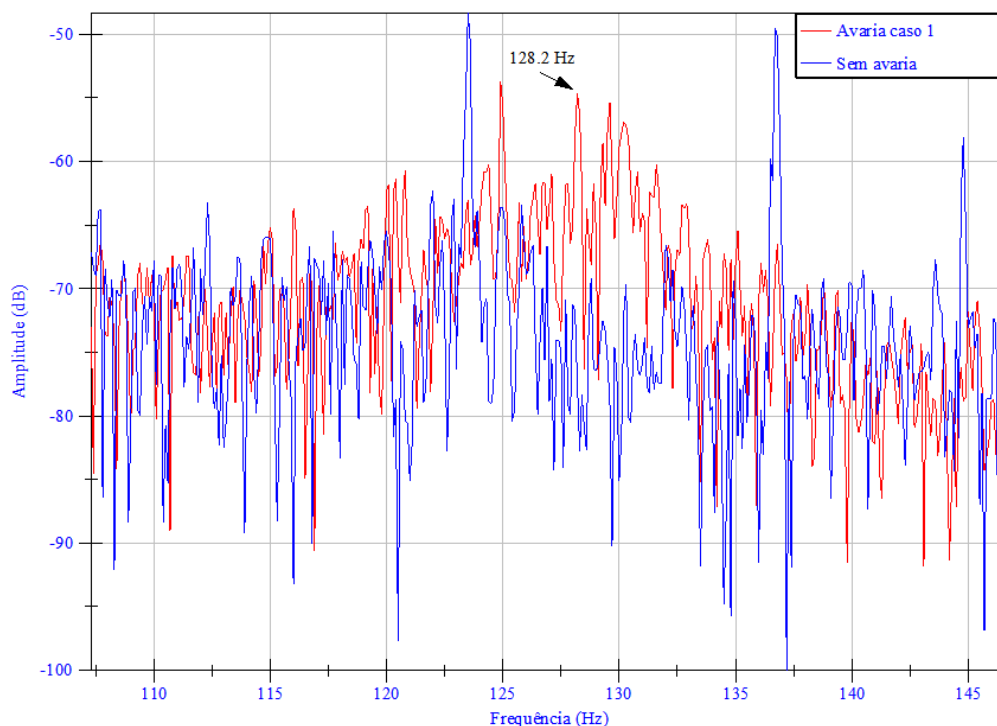


Fig. 5.1 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.

⁸ Nem sempre é exactamente coincidente com a frequência observada no espectrograma.

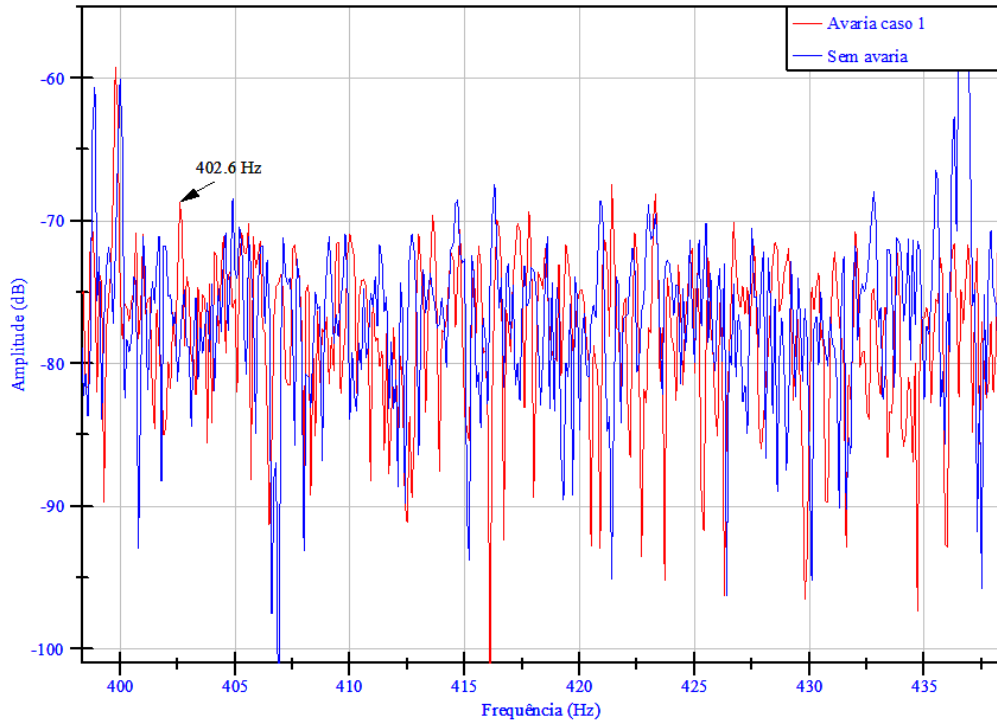


Fig. 5.2 - Análise espectral da corrente eléctrica estática com o motor a rodar a 1500 rpm.

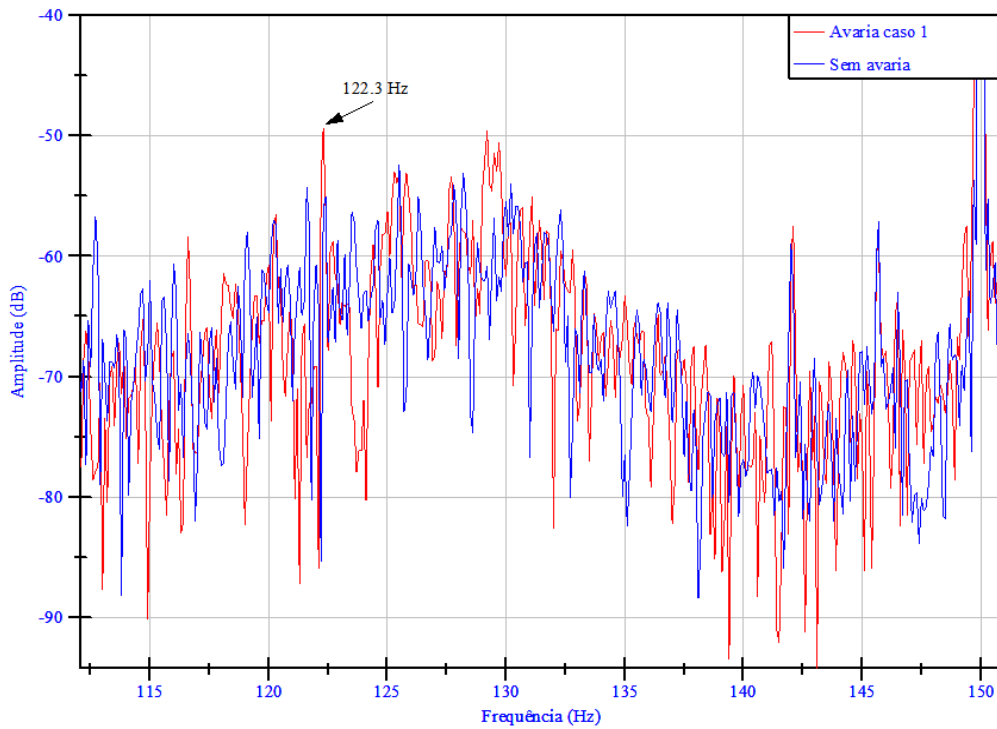


Fig. 5.3 - Análise espectral da corrente eléctrica estática com o motor a rodar a 1446 rpm.

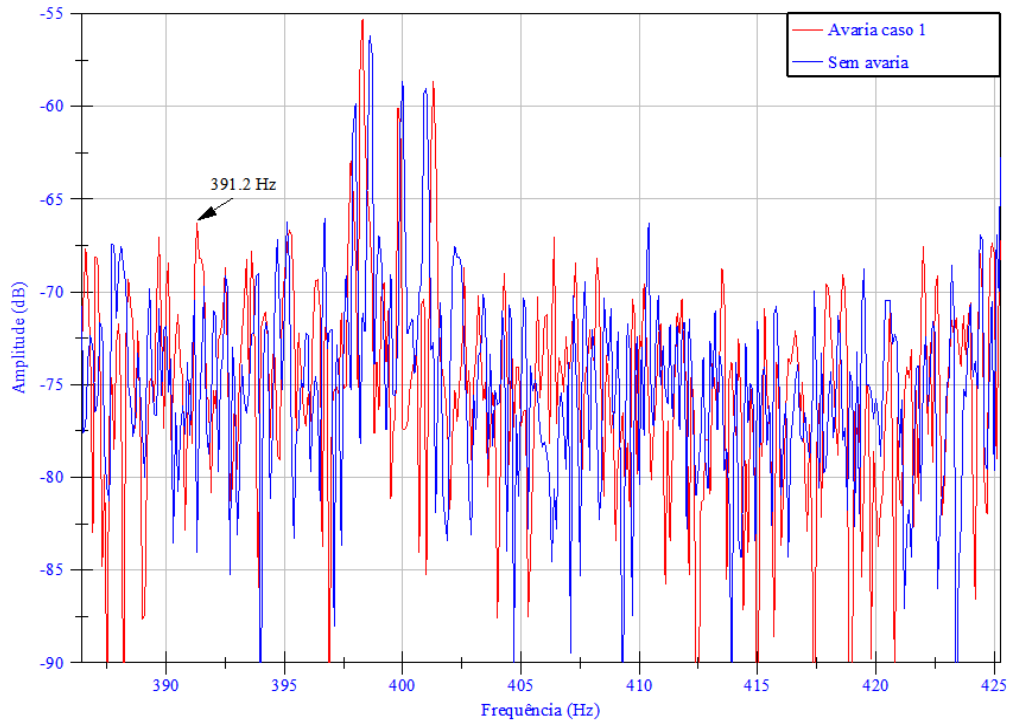


Fig. 5.4 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1446 rpm.

Como se pode observar nas quatro figuras anteriores a diferença entre a situação normal e a situação de avaria é evidente. Apesar da amplitude das componentes espectrais ser superior na situação em que o motor está à plena carga, é importante verificar que a diferença de amplitudes entre as componentes do sinal que representa a avaria e as componentes do sinal que representa a situação normal, para cada nível de carga individualmente, é superior quando o nível de carga é menor. Este facto está de acordo com o que é referido em [27], que aborda o efeito de amortecimento das componentes espectrais com o aumento do nível de carga.

Caso 2

Neste caso foi testado até que ponto a diferença no estágio da avaria a torna mais facilmente detectável pelo método de análise adoptado. A diferença para o caso anterior está relacionada com o diâmetro do furo efectuado no anel externo do rolamento, que passou a ser de 4 mm. As frequências características da avaria, como se pode ver na Tabela 5.4, mantêm-se inalteradas porque a velocidade utilizada nos ensaios foi igual ao caso anterior e o defeito continua a ser no anel externo do rolamento DE.

Tabela 5.4 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente eléctrica estatórica e respectiva amplitude (caso 2).

Figura	Velocidade (rpm)	k	f_{bng} (Hz)	$\Delta Amp.$ (dB)
Fig. 5.5	1500	2	128.41	6.4
		2	228.41	6.4
		4	406.82	0.8
Fig. 5.6	1446	2	121.99	3.9
		2	221.99	6.3
		4	393.98	2.6

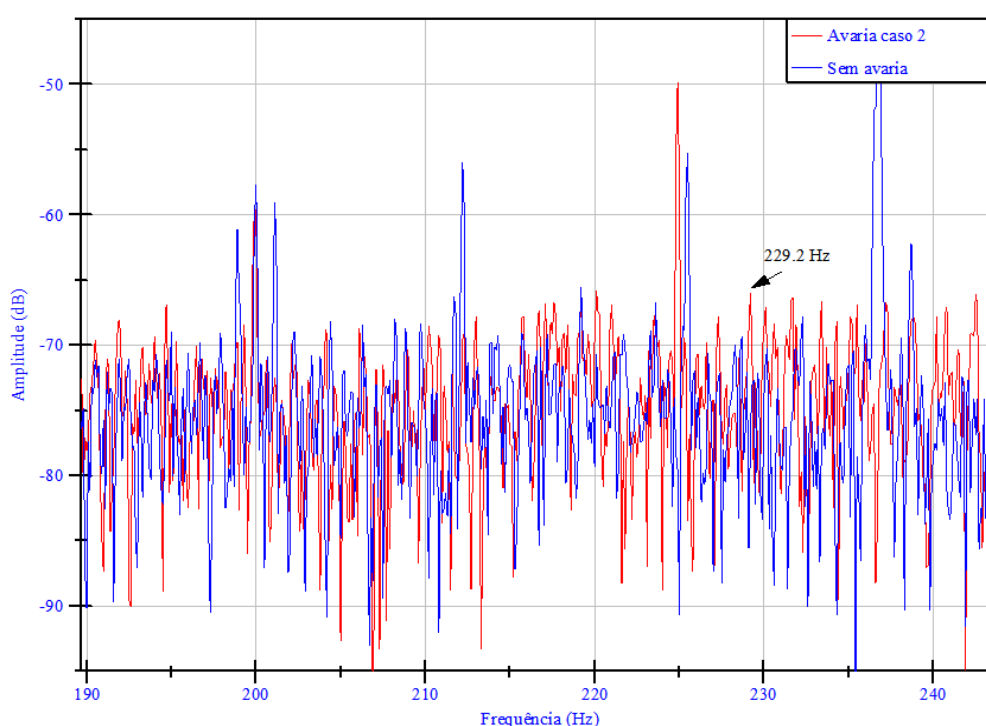


Fig. 5.5 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.

Apesar do aumento da severidade da avaria, os valores da diferença entre a amplitude das componentes espectrais da situação normal relativamente à situação com avaria presentes na Tabela 5.4 não exprimem categoricamente esse aumento. De facto existem componentes em que esse aumento se verifique e outras em que não é tão evidente, mas na generalidade das situações o que acontece é que passa a existir um maior número de frequências características de avaria identificáveis no espectrograma da corrente. Um bom exemplo disso é o caso da Fig. 5.6 onde facilmente se identifica uma componente à frequência de 136.9 Hz correspondente à frequência

característica de avaria 135.99 Hz ($k=1$) e que, comparando com a Fig. 5.3 pode-se confirmar que nesta última a mesma frequência característica de avaria dificilmente se identifica.

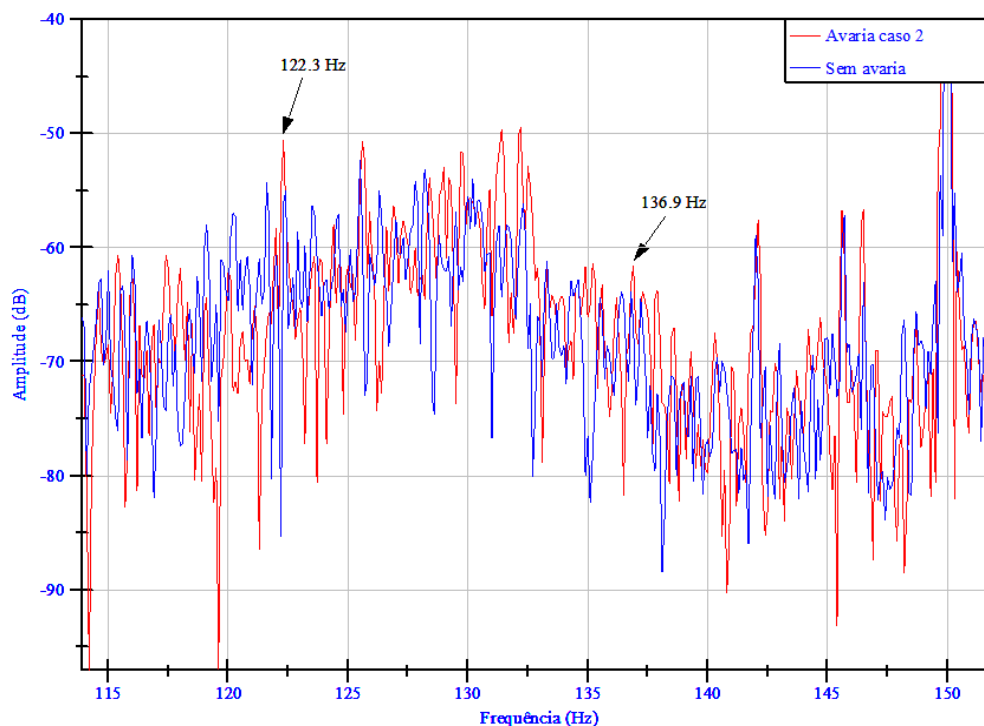


Fig. 5.6 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1446 rpm.

Caso 3

Considera-se agora o caso de avaria no anel interno do rolamento DE e o comportamento das componentes espectrais da corrente consoante as várias situações de avaria e de carga. As frequências características da avaria são calculadas como anteriormente, excepto a frequência característica de vibração utilizada em (3.4) que será a correspondente ao anel interno.

Tabela 5.5 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente eléctrica estatórica e respectiva amplitude (caso 3).

Figura	Velocidade (rpm)	k	f_{bng} (Hz)	$\Delta Amp.$ (dB)
-	1500	1	185.79	1.3
		2	221.59	6.7
		3	457.38	5.4
Fig. 5.7	1446	1	180.91	1.7
		2	211.81	4.3
		3	442.72	2.4

Comparando os valores que registam a diferença entre as amplitudes das componentes associadas à avaria e as amplitudes das componentes associadas ao sinal normal facilmente se verifica que na última tabela (Tabela 5.5) esses valores são inferiores aos valores da Tabela 5.3 (caso 1), onde a avaria era no anel externo. Isto aponta no sentido de ser mais fácil a detecção de avarias no anel externo do que no anel interno, no caso de ser utilizado este método de diagnóstico.

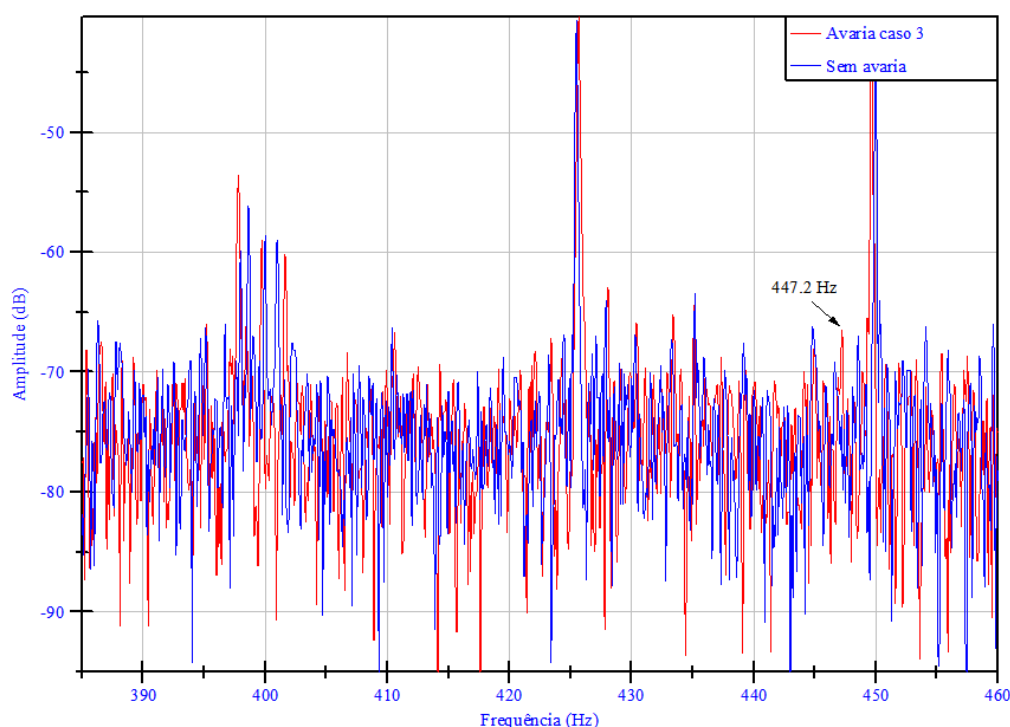


Fig. 5.7 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1446 rpm.

A Fig. 5.7 permite identificar com alguma clareza uma das componentes que corresponde à avaria no anel interno do rolamento DE com o motor a rodar à velocidade de 1446 rpm.

Caso 4

Analogamente ao que foi feito para o anel externo agora será também analisada uma avaria mais severa no caso do anel interno. O que acontece quando é analisada uma situação em que simulamos uma avaria com um grau de severidade superior é a identificação de um maior número de componentes espectrais correspondentes às frequências características da avaria. A diferença não se trata essencialmente no aumento da amplitude das componentes espectrais que eram detectáveis num estágio precoce da avaria, mas trata-se de um aumento de outras componentes espectrais características da avaria que anteriormente não se detectavam.

Caso 5

Trata-se da análise da situação em que o rolamento do lado NDE é o que está sujeito à avaria. Seguindo o procedimento anterior analisa-se primeiro a situação em que a avaria se encontra num estado precoce (furo 2 mm) e faz-se a comparação para dois níveis de carga distintos, como se pode ver na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da corrente eléctrica estatórica e respectiva amplitude (caso 5).

Figura	Velocidade (rpm)	k	f_{bng} (Hz)	ΔAmp. (dB)
Fig. 5.8	1500	3	317.91	7.5
		5	496.53	2.6
		6	485.84	2.5
-	1446	3	308.27	3.7
		5	480.45	4.9
		6	466.55	2.2

Quando se procede à análise deste rolamento verifica-se que as componentes espectrais características da avaria começam a ser evidentes para valores de k superiores. Outro facto importante de observar é que se compararmos este caso com o caso 1 podemos verificar que a diferença entre as amplitudes das componentes espectrais associadas à avaria e as correspondentes amplitudes das componentes associadas ao sinal normal decresce no caso da avaria surgir no rolamento do lado NDE.

Quando o nível de carga do motor é alterado para um nível superior as diferenças não são tão notórias como no rolamento do lado DE, mas à semelhança do que acontecia nos outros casos, continua a ser possível a identificação de algumas componentes relativas à avaria. A Fig. 5.8 ilustra o que foi descrito anteriormente, relativo à diferença entre as amplitudes das componentes associadas à avaria e as correspondentes amplitudes das componentes associadas ao sinal normal. Pode dizer-se que a detecção de avaria fica mais difícil para este rolamento.

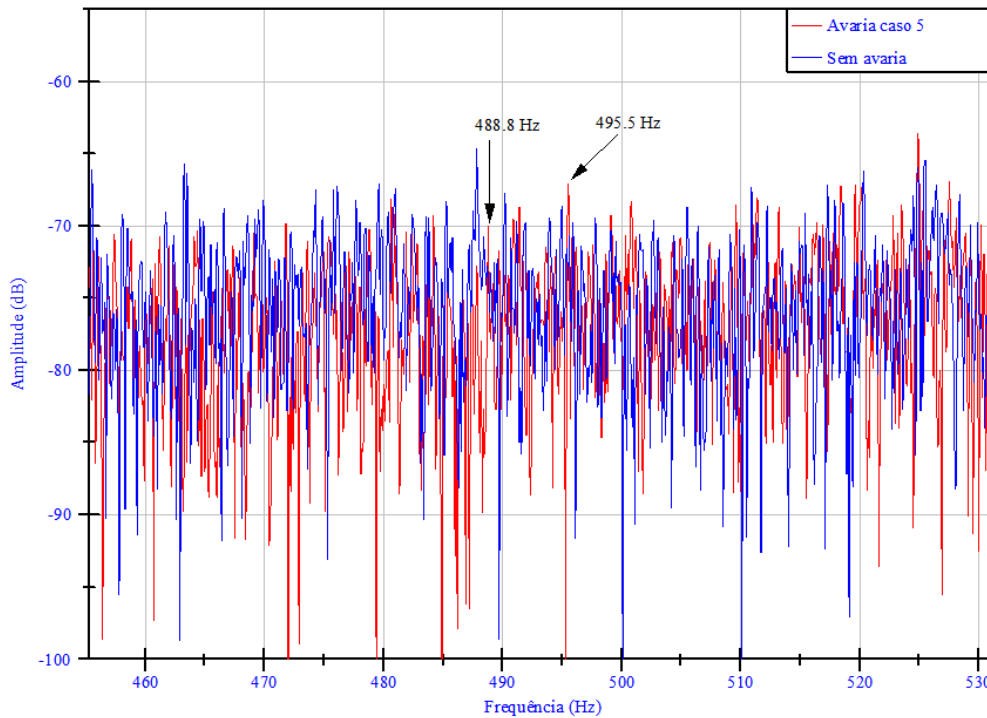


Fig. 5.8 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.

Caso 6

Neste caso a única diferença que surgiu foi o aumento do diâmetro do orifício que foi feito no anel externo do rolamento. Este aumento tem o objectivo de simular uma situação em que a severidade da avaria é maior. Como resultado prático, conseguiu-se identificar um maior número de componentes espectrais características da avaria.

Casos 7 e 8

Nos casos 7 e 8 a avaria foi provocada no anel interno do rolamento correspondente ao lado NDE e pode-se observar pelo espectrograma da corrente eléctrica da Fig. 5.9 que é possível identificar algumas componentes características da avaria, apesar de se verificar que as amplitudes das componentes correspondentes à avaria são relativamente reduzidas.

À semelhança do que ocorria no caso 5, também as frequências características da avaria tornam-se identificáveis no espectrograma da corrente para valores de k superiores. No caso da Fig. 5.9 são identificáveis frequências características da avaria cujo o k toma valores inteiros de 3 e 4.

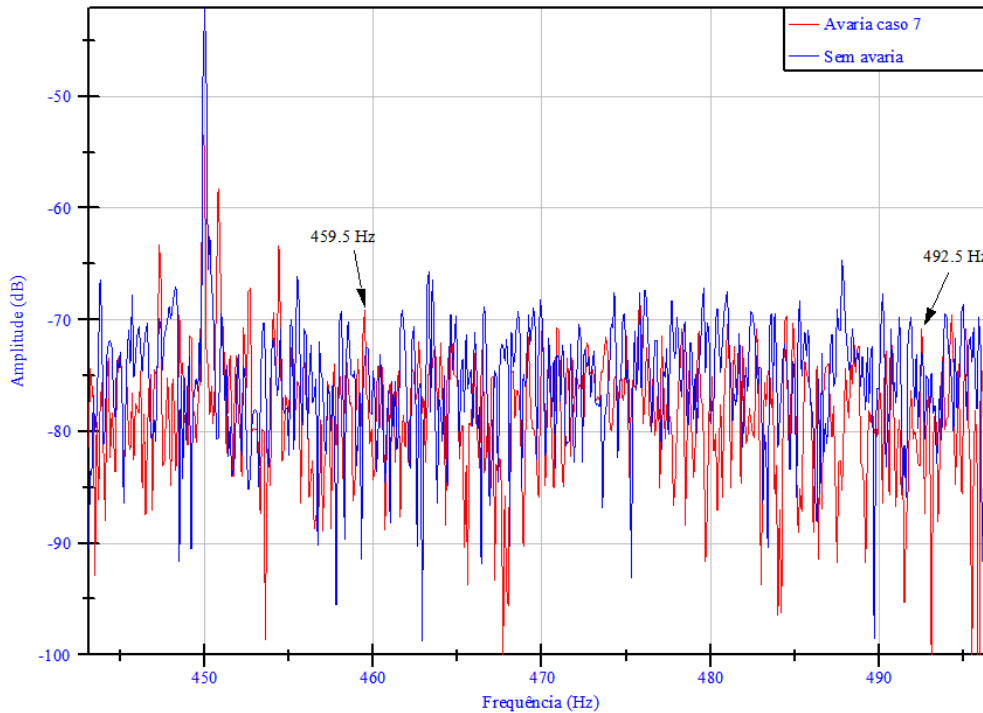


Fig. 5.9 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.

Casos A e B

O caso A e o caso B foram simulados para despistar algumas dúvidas que podiam surgir ao longo da análise dos outros casos. É um facto que os casos até agora analisados incidiam sobre avarias em que o defeito era num único ponto e em casos onde a alimentação do motor era realizada através de um autotransformador sem dispositivos de electrónica de potência pelo meio. O objectivo destes casos será o de perceber o limite de aplicabilidade que os métodos não invasivos, baseados na análise das correntes de alimentação do motor, podem ter.

No caso A a avaria é a mesma do caso 2, logo as frequências características de vibração são iguais para velocidades de rotação do motor iguais. O conversor de frequência introduz um conteúdo espectral na corrente ao ponto de reduzir a identificação de componentes espectrais características da avaria. A Fig. 5.10 quando comparada com a Fig. 5.5 ilustra uma diferença evidente na identificação das frequências características da avaria, repare-se que para $k=2$ (228.41 Hz⁹) a avaria identifica-se melhor na Fig. 5.5.

Contudo, o espectrograma da corrente eléctrica continua a ter frequências características da avaria identificáveis. Como se percebe na Fig. 5.10 para $k=3$ existe uma frequência que se destaca e que permite associá-la à avaria.

⁹ Surge no espectrograma com o valor assinalado de 229.2 Hz.

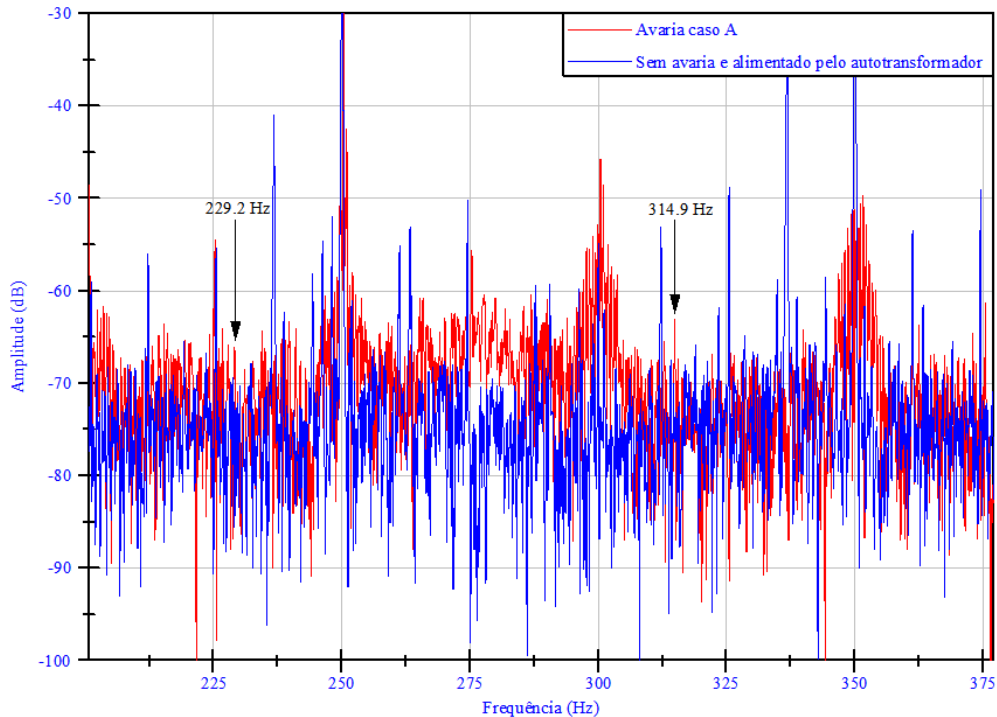


Fig. 5.10 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.

Já no caso B as componentes espectrais correspondentes à avaria são mais facilmente identificáveis apesar da avaria apresentar rugosidade generalizada (vários furos ao longo do anel externo). É um bom exemplo do que pode acontecer no caso da ocorrência de *false-brinelling*.

Caso C

O caso C pretende analisar até que ponto um pequeno defeito numa das esferas de um rolamento radial permite identificar a avaria. De facto, o defeito provocado é imperceptível no espectrograma da corrente tornando este tipo de defeitos complicados de diagnosticar.

Caso D

Este caso trata-se de uma situação especial onde é testado um rolamento cónico com estrias no anel exterior e onde se tentam obter resultados semelhantes aos obtidos nos casos em que se analisaram rolamentos radiais de esferas.

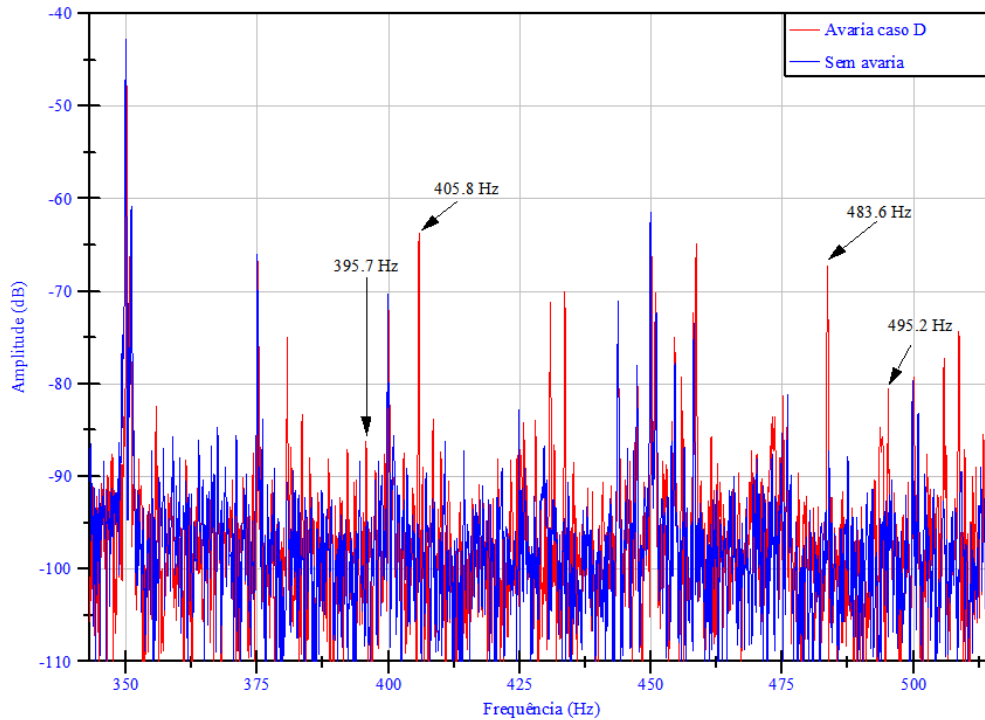


Fig. 5.11 - Análise espectral da corrente eléctrica estatórica com o motor a rodar a 1500 rpm.

A Fig. 5.11 ilustra claramente algumas das frequências características da avaria correspondentes a $k=4$, $k=5$ e $k=6$. O cálculo destas frequências foi igual ao realizado no caso 1 daí que existam algumas limitações na análise deste caso. Essas limitações são consequência de se estarem a utilizar fórmulas próprias de rolamentos radiais em rolamentos cónicos.

5.3 EPVA

Como referido no Capítulo 3, esta técnica além de manter as características não invasivas da análise espectral da corrente estatórica do motor, apresenta uma mais-valia relativamente à técnica de análise utilizada anteriormente que está relacionada com o facto de utilizar as correntes das três fases para obtenção do espectrograma final. Desta forma, garante-se que qualquer desequilíbrio que exista numa das fases é reflectido na análise final, o que não acontece quando, pela técnica anterior, se analisa só uma fase e generaliza-se para as restantes partindo do princípio que não existem assimetrias estatóricas.

Em situações de avaria nos rolamentos, as componentes espectrais características da avaria no espectrograma do EPVA podem relacionar-se com as componentes calculadas para o espectrograma da corrente estatórica através da seguinte equação [31]:

$$f_{epva} = |f_s - f_{bng}| \quad (5.1)$$

Caso 1

À semelhança do que foi feito anteriormente começámos a analisar as avarias que afectam o rolamento num único ponto e posteriormente tratámos as que se caracterizam pela rugosidade mais generalizada da superfície. Para o caso 1 são apresentadas na Tabela 5.7 três frequências características da avaria.

Tabela 5.7 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA e respectiva amplitude (caso 1).

Figura	Velocidade (rpm)	k	f_{bng} (Hz)	$\Delta Amp.$ (dB)
Fig. 5.12	1500	2	78.41	11.9
		3	267.62	4
		4	356.82	1.5
-	1446	2	71.99	7.5
		3	257.98	1.1
		4	343.98	3.6

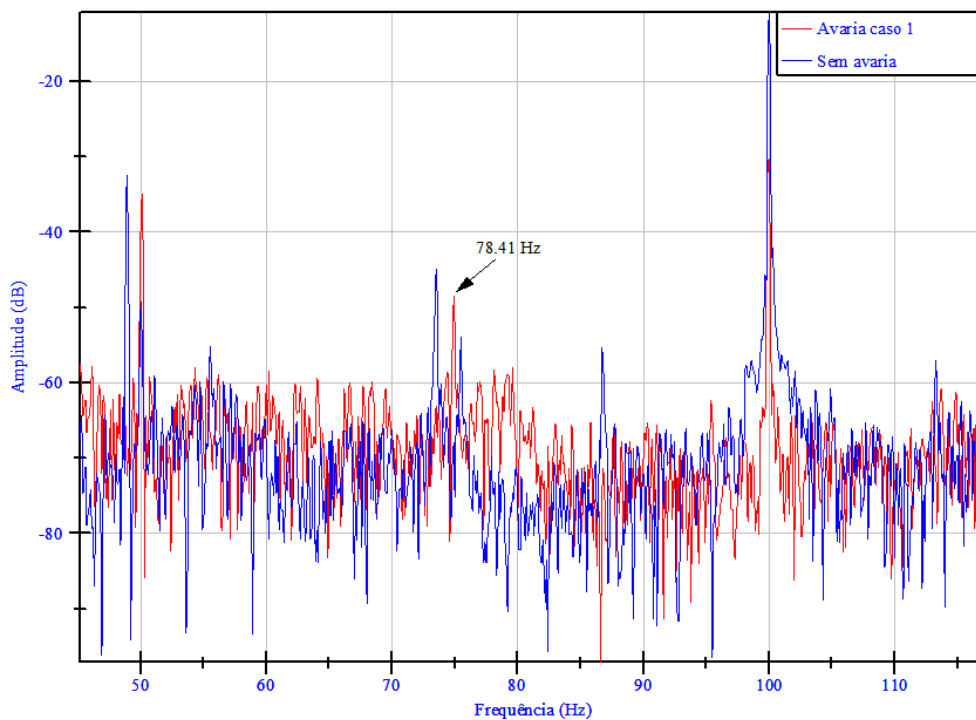


Fig. 5.12 - Representação da assinatura do EPVA com o motor a rodar a 1500 rpm.

A relação entre o espectrograma da corrente e a representação do EPVA expressa por (5.1) pode-se observar quando se compara a Fig. 5.1 com a Fig. 5.12. Ambas representam frequências

características de avaria para $k=2$ e ambas são identificáveis nas respectivas representações gráficas.

Como pela análise anterior já se identificava uma dificuldade acrescida para detectar todas as componentes espectrais características da avaria quando o nível de carga é próximo do nominal, no caso da assinatura EPVA essa situação volta a ser evidente. Conseguem-se identificar as situações que eram mais evidentes quando o motor roda a 1500 rpm, mas nota-se que há um amortecimento das componentes espectrais como consequência do aumento do nível da carga do motor.

Caso 2

Este caso pretende averiguar até que ponto o aumento da severidade da avaria é significativo no processo de detecção da mesma.

Tabela 5.8 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA e respectiva amplitude (caso 2).

Figura	Velocidade (rpm)	k	f_{bng} (Hz)	ΔAmp. (dB)
-	1500	2	78.41	10.3
		3	267.62	3.4
		4	356.82	3.5
-	1446	2	71.99	5.5
		3	257.98	1.5
		4	343.98	4.6

A situação analisada permitiu esclarecer que no caso em que o motor roda a 1500 rpm o aumento da severidade da avaria não se traduz num aumento significativo do número de componentes espectrais características da avaria identificadas. Já no caso em que o nível de carga do motor é superior, esse aumento da severidade da avaria facilita a identificação das componentes características da mesma.

Caso 3

Nesta situação, à semelhança do que acontecia quando foi usada a análise espectral da corrente estatórica, verificou-se uma redução das componentes características da avaria identificadas. Contudo a Tabela 5.9 assinala algumas componentes que se evidenciam relativamente à situação sem avaria.

Relativamente à situação em que o nível de carga é alterado reflecte-se a tendência de diminuição da diferença entre a amplitude das componentes espectrais características de avaria do sinal representativo da avaria e a amplitude das correspondentes componentes no caso do sinal com o rolamento normal, ou seja as curvas a vermelho e a azul aproximam-se ligeiramente. O que é anteriormente explicado pode ser analisado na Tabela 5.9, com a excepção das frequências para $k=4$, que não reflectem a análise anterior.

Tabela 5.9 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA e respectiva amplitude (caso 3).

Figura	Velocidade (rpm)	k	f_{bng} (Hz)	ΔAmp. (dB)
-	1500	2	171.59	9.8
		3	407.38	5.2
		4	443.18	1.1
-	1446	2	161.81	6.4
		3	392.72	2.9
		4	423.62	3.4

Caso 4

Novamente uma extensão da avaria que existia no caso 3, e comparando-a com a situação anterior põe em causa a frequência característica da avaria obtida para $k=3$ (407.38 Hz) como se pode ver pela Tabela 5.10. Outro facto que vale a pena ter atenção é a diferença de amplitude entre o sinal representativo da avaria e o sinal normal, que neste caso aumentou com o aumento do nível de carga do motor. Estes aspectos vêm comprovar a necessidade de analisar várias componentes espectrais com o objectivo de fazer um diagnóstico o mais assertivo possível.

Tabela 5.10 – Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA e respectiva amplitude (caso 4).

Figura	Velocidade (rpm)	k	f_{bng} (Hz)	ΔAmp. (dB)
-	1500	2	171.59	12.8
		3	407.38	0.8
		4	443.18	2.9
-	1446	2	161.81	-
		3	392.72	2.8
		4	423.62	7.1

Casos 5

Este caso é correspondente à análise de avarias no rolamento do lado NDE e mantém-se o que foi concluído pela técnica anterior onde era referido que este tipo de avarias não é detectável tão facilmente. Contudo, com esta técnica, é conseguida uma evidência superior nas componentes características da avaria e desfazem-se algumas dúvidas noutras componentes que são consequência de desequilíbrios externos à avaria.

Tabela 5.11 - Frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA e respectiva amplitude (caso 5).

Figura	Velocidade (rpm)	k	f_{bng} (Hz)	ΔAmp. (dB)
Fig. 5.13	1500	2	178.61	1.4
		3	267.92	4.3
		4	357.22	2.4
-	1446	2	172.18	-
		3	258.27	2.8
		4	344.36	2.2

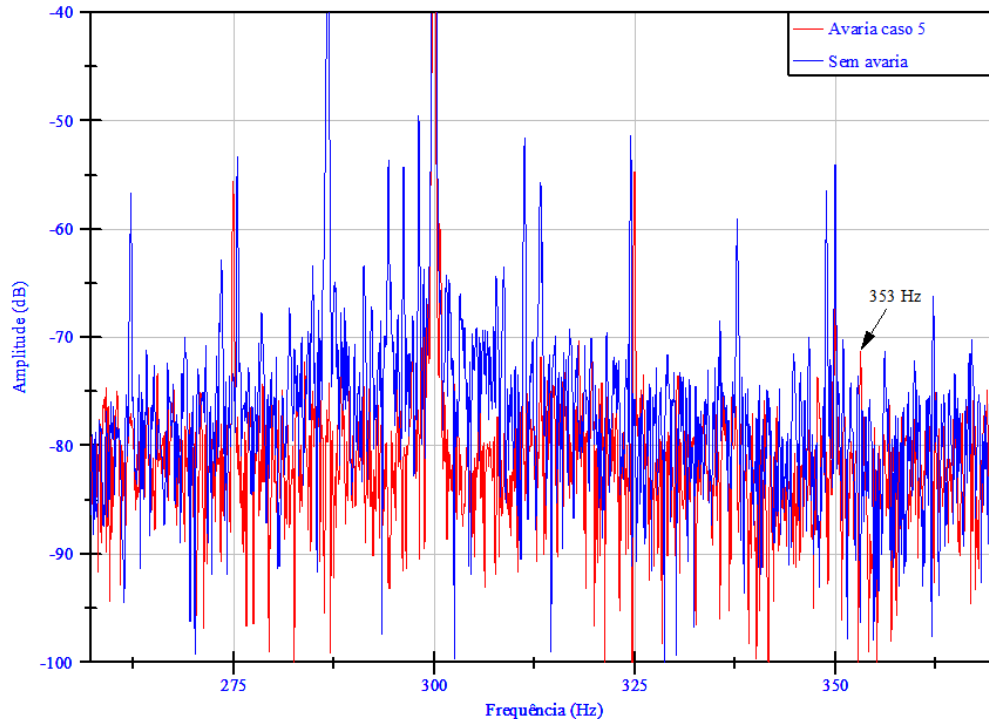


Fig. 5.13 - Representação da assinatura do EPVA com o motor a rodar a 1500 rpm.

É de notar que não existem frequências relativamente próximas da componente que caracteriza a avaria que possam suscitar dúvidas na caracterização da mesma.

Caso 6

Verifica-se que o aumento da severidade da avaria provoca o esperado: aumenta a diferença entre as amplitudes das componentes espectrais características da avaria e as correspondentes componentes da situação sem avaria.

Caso 7 e 8

São situações mais difíceis de identificar, por se tratar de avarias no rolamento do lado NDE e por se localizarem no anel interno contudo para que se tenha uma noção mais precisa das componentes espectrais características da avaria possíveis de identificar, em doze componentes espectrais analisadas (para sucessivos valores de k) só quando k toma valores de 1, 2 e 4 é possível distinguir a avaria. O nível de carga continua a influenciar ligeiramente a análise.

Casos A e B

São casos diferentes dos analisados anteriormente e apesar de pela assinatura do EPVA se identificarem mais componentes características da avaria do que pela técnica anterior, no caso A continua-se a ter um espectrograma com conteúdo espectral denso que não permite uma boa eficácia no diagnóstico.

Relativamente ao caso B a avaria, apesar de ser diferente das restantes, é facilmente identificável e a assinatura EPVA seguinte demonstra isso mesmo.

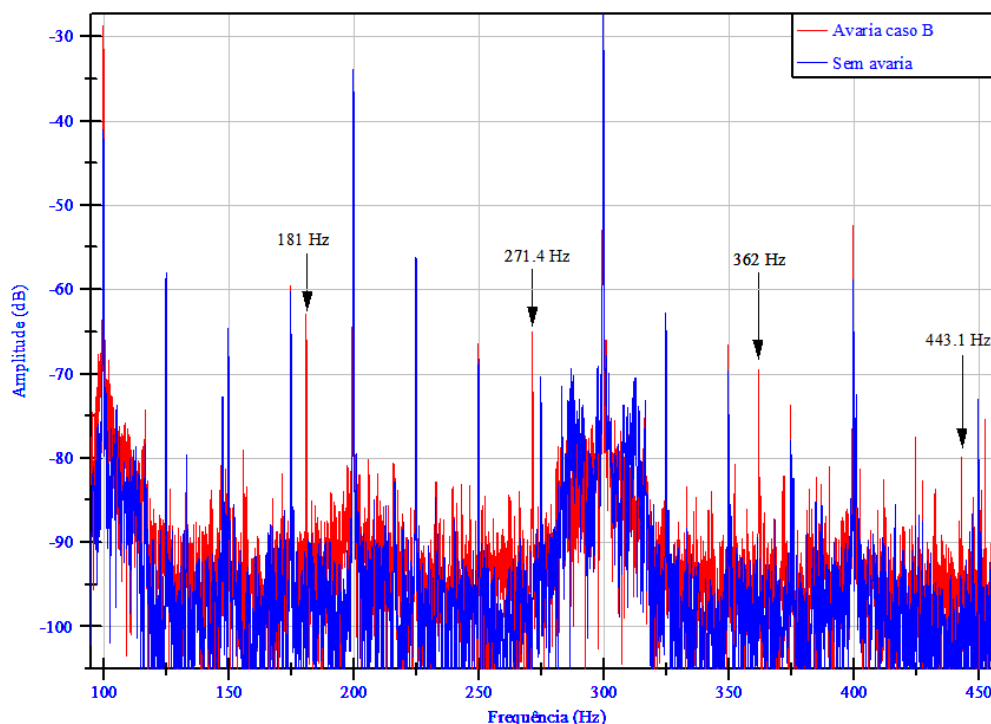


Fig. 5.14 - Representação da assinatura do EPVA com o motor a rodar a 1500 rpm.

Casos C e D

À semelhança do que acontecia na análise espectral da corrente de alimentação do motor, também com o EPVA se percebe que o caso C é difícil de diagnosticar já que não são identificáveis frequências características da avaria.

Já no caso D as frequências são bem identificáveis e são suficientes para fazer o diagnóstico da avaria.

Comparando a técnica da análise espectral da corrente eléctrica com a análise da assinatura do EPVA pode-se concluir que esta técnica de análise é extremamente importante para despistar situações em que os resultados, retirados da análise espectral da corrente estatórica de uma única fase de alimentação do motor, induzem o erro no diagnóstico.

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

6.1 Conclusão

A presente dissertação serviu para desenvolver o tema do diagnóstico de avarias nos rolamentos de um motor de indução trifásico. É um tema interessante e importante na actualidade dada a generalização que o motor de indução trifásico atravessa e a frequência com que as avarias relacionadas com os rolamentos ocorrem.

As avarias mais frequentes nos rolamentos e as suas características foram estudadas previamente para que fosse possível proceder à simulação das mesmas com a maior exactidão possível. Os rolamentos foram avariados externamente com o auxílio de máquinas capazes de provocar os defeitos necessários para poder simular o conjunto de situações desejadas. Cada situação tem um conjunto de particularidades que permitem aproximar a situação experimental da situação real.

As técnicas de diagnóstico utilizadas foram: a análise espectral da corrente de alimentação do motor e o EPVA. Foram utilizadas com o intuito de relacionar os resultados obtidos com cada uma delas e perceber até que ponto podem ser utilizadas independentemente, ou, se por outro lado é vantajoso utilizar as duas de forma complementar.

Ao analisar os dados relativos aos ensaios realizados retiraram-se algumas conclusões interessantes. De assinalar que o nível de carga do motor, assim como a extensão da própria avaria e também o local exacto onde a avaria se encontra no próprio rolamento influenciam a eficácia do diagnóstico. Assim sendo, segundo se pôde apurar um nível de carga superior provoca uma diminuição da diferença entre a amplitude do sinal normal e a amplitude do sinal característico da avaria. Por outro lado, uma avaria com um nível de severidade superior (furo 4 mm) provocará um maior número de frequências características da avaria identificáveis no espectrograma da corrente e na representação do EPVA, mas, ao contrário do que seria de esperar, as frequências que são identificáveis quando a avaria está num estado precoce (furo 2 mm) não passam a evidenciar-se mais pelo facto da severidade da avaria ter aumentado substancialmente.

Outra conclusão importante é o facto da localização da avaria no próprio rolamento influenciar o diagnóstico. Como tal, uma avaria localizada no anel externo é mais facilmente detectada do que, nas mesmas condições, uma que seja localizada no anel interno.

Nos casos A, B, C e D tentaram-se despistar algumas situações particulares que não são comuns na bibliografia. O caso em que o motor foi alimentado por um conversor de frequência

conduziu a resultados que permitem identificar as frequências características da avaria com alguma dificuldade, isto porque o conversor de frequência introduz algumas componentes espectrais que se confundem com as procuradas.

O caso B, mesmo não sendo uma avaria num único ponto, é facilmente identificável permitindo o diagnóstico da avaria. Já as avarias nas esferas são mais complicadas de diagnosticar, no caso C analisou-se a avaria numa única esfera e o resultado a que se chegou não permitiu detectar a presença da avaria.

Outra situação particular analisada foi a avaria provocada no rolamento cónico que, utilizando as equações válidas para os rolamentos radiais de esferas, conseguiu-se identificar as frequências características da avaria.

Relativamente às técnicas de análise utilizadas é de salientar que ambas se baseiam nas frequências características de vibração para calcular as componentes espectrais associadas à avaria em causa. Contudo, com o EPVA conseguem-se espectrogramas em que as frequências características da avaria são melhor identificáveis relativamente à análise do espectrograma da corrente de alimentação do motor. Apesar disso, é aconselhável utilizar as duas técnicas em conjunto para despistar situações em que a análise de uma única técnica induz ao erro do diagnóstico. Um pormenor importante é o número de valores de k que se analisou para cada situação, nesta dissertação foram analisados sete valores de k (1-7).

Posto isto, resta referir que para obter um bom padrão de falha, que seja claramente indicativo da mesma, não é suficiente analisar uma ou duas componentes características de avaria.

6.2 Sugestões de trabalho futuro

Como forma de melhorar e aperfeiçoar o trabalho desenvolvido, sugere-se o desenvolvimento de alguns trabalhos futuros:

- ∴ Tornar estas técnicas não invasivas independentes do nível de carga do motor e do sistema que o alimenta.
- ∴ Conseguir um bom diagnóstico com um menor número de componentes espectrais analisadas.
- ∴ Usar outras técnicas de diagnóstico, como por exemplo, a análise do binário ou da potência activa.
- ∴ Realizar testes com avarias nos rolamentos que tenham sido provocadas de forma *online*.

Bibliografia

- [1] M. J. Devaney and L. Eren, "Detecting motor bearing faults", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 7, pp. 30-50, December 2004.
- [2] J. L. H. Silva, "Diagnóstico e análise de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos", Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2005.
- [3] S. M. A. Cruz, "Diagnóstico e Análise de Avarias nos Enrolamentos Estatóricos de Motores de Indução Trifásicos Através da Aplicação do Método dos Referenciais Múltiplos", Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 2004.
- [4] K. K. Pandey, P. H. Zope, S. R. Suralkar, "Review on Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motor", *International Journal of Computer Applications (IJCA)*, NY, USA, September 2012.
- [5] A. Bellini, F. Immovilli, R. Rubini, and C. Tassoni, "Diagnosis of Bearing Faults of Induction Machines by Vibration or Current Signals: A Critical Comparison", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008*, Edmonton, Alta, pp. 1-8, October-2008.
- [6] A. H. Bonnett, "Root cause failure analysis for AC Induction Motors in the petroleum and chemical industry", Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC), MO, USA, September 2010.
- [7] S. Nandi, H. A. Toliyat, and L. Xiaodong, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, pp. 719-729, December 2005.
- [8] R. Dória, "Manutenção de Rolamentos", *Manutenção*, vol. 112, pp. 70, 72, 74-76, 78, 79, 1º trimestre 2012.
- [9] Catalogo No. E1102j, NSK, Rolling Bearings, Japan, 2011. [Online] Available: <http://www.jp.nsk.com/app01/en/ctr/index.cgi?rm=pdfView&pno=e1102k>
- [10] C. Sadarangani, *Electrical Machines-Design and Analysis of Induction and Permanent Magnet Motors*, vol. 1, KTH-Sweden, 2006.
- [11] Catalogo No. 6230 EN, SKF, Rolling Bearings in Electric Motors and Generators, 2012. [Online] Available: http://www.skf.com/group/knowledge-centre/subscriptions/displayfactbox.html?itemid=12-73096&WT.oss=rolling%20bearings%20in%20electric%20motors%20and%20generator&WT.z_oss_boost=0&tabname=All&WT.z_oss_rank=1
- [12] A. H. Bonnett, "Cause and analysis of bearing failures in electrical motors", *Petroleum and Chemical Industry Conference*, San Antonio, TX , pp. 87-95, September 1992.
- [13] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, and R. G. Bartfield, "Motor bearing damage detection using stator current monitoring", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, pp. 1274-1279, Nov/Dec 1995.

- [14] P. L. Alger and H. W. Samson, "Shaft Currents in Electric Machines", *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XLIII, pp. 235-245, Jan 1924.
- [15] D. Busse, J. Erdman, R. J. Kerkman, D. Schlegel, and G. Skibinski, "Bearing currents and their relationship to PWM drives", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, pp. 243-252, Mars 1997.
- [16] A. K. Datta, M. Dubey, and S. Jain, "Study of shaft voltage & bearing currents in electrical machines", in *IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS 2012)*, Bhopal, India, pp. 1-4, Mars 2012.
- [17] J. M. Erdman, R. J. Kerkman, D. W. Schlegel, and G. L. Skibinski, "Effect of PWM inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, pp. 250-259, Mar/Apr 1996.
- [18] D. F. Busse, J. M. Erdman, R. J. Kerkman, D. W. Schlegel, and G. L. Skibinski, "The effects of PWM voltage source inverters on the mechanical performance of rolling bearings", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, pp. 567-576, Mar/Apr 1997.
- [19] S. Bell, T. J. Cookson, S. A. Cope, R. A. Epperly, A. Fischer, D. W. Schlegel, *et al.*, "Experience with variable-frequency drives and motor bearing reliability", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, pp. 1438-1446, Sep/Oct 2001.
- [20] W. Saadaoui and K. Jelassi, "Induction motor bearing damage detection using stator current analysis", *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, Malaga, Spain, pp. 1-6, May 2011.
- [21] B. Li, C. Mo-Yuen, Y. Tipsuwan, and J. C. Hung, "Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, pp. 1060-1069, Oct 2000.
- [22] *Mechanical Vibration-Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-rotating Parts-Part 1*, General Guidelines ISO 10816-1, 1995.
- [23] *Mechanical Vibration-Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-rotating Parts-Part 3*, General Guidelines ISO 10816-3, 1998.
- [24] Z. Wei, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review", *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives 2007*, Cracow, pp. 3-6, 6-8 Spt. 2007.
- [25] J. R. Stack, "Fault signature detection for rolling element bearings in electric machines", Tese de Doutorado, Georgia Institute of Technology, Nov. 2002.
- [26] M. El Hachemi Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, pp. 984-993, Oct 2000.

- [27] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, and R. G. Bartheld, "Motor bearing damage detection using stator current monitoring", *Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1994 IEEE*, Denver, CO, pp. 110-116 vol.1, 2-6 Oct 1994.
- [28] J. Jee-Hoon, J.-J. Lee, and K. Bong-Hwan, "Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, pp. 1842-1852, Dec 2006.
- [29] S. M. A. Cruz and A. J. M. Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, pp. 1227-1233, Sep/Oct 2001.
- [30] A. J. M. Cardoso, "Diagnóstico e análise da ocorrência de excentricidade estática em motores de indução trifásicos, através da aplicação da transformação complexa espacial (Vector de Park)", Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, Coimbra, 1995.
- [31] S. M. A. Cruz, "O Vector de Park no diagnóstico da ocorrência de fracturas na gaiola rotórica de motores de indução trifásicos", Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, 1999.
- [32] B. Trajin, J. Regnier, and J. Faucher, "Bearing fault indicator in induction machine using stator current spectral analysis", in *4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008*, Toulouse, France, pp. 592-596, April 2008.
- [33] Catalogo No. N. P. Bearing, Ball Bearings, USA, 2000. [Online]

Os direitos da imagem presente na capa pertencem à NKE Áustria GmbH e está disponível em: <http://www.nke.at/uploads/media>.