

# Diagnóstico de Avarias nos Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos

José L. H. Silva<sup>1</sup>

A. J. Marques Cardoso<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escola Superior de Tecnologia de Viseu  
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial  
Campus Politécnico de Repeses, P - 3504-510 Viseu, Portugal  
Telef:+351 232 480 625, Fax:+351 232 424 651, e-mail: [jsilva@demgi.estv.ipv.pt](mailto:jsilva@demgi.estv.ipv.pt).

<sup>2</sup> Universidade de Coimbra, DEEC/ IT  
Pólo II – Pinhal de Marrocos, P - 3030-290 Coimbra, Portugal  
Telef:+351 239 796 232, Fax:+351 239 796 247, e-mail: [ajmcardoso@ieee.org](mailto:ajmcardoso@ieee.org).

**Resumo.** Este artigo descreve alguns dos principais métodos de diagnóstico das avarias que vulgarmente afectam o funcionamento dos rolamentos de motores de indução trifásicos.

São apresentados diversos resultados experimentais, obtidos com rolamentos nos quais foram artificialmente introduzidos alguns dos tipos mais comuns de avarias, resultantes da aplicação da análise espectral das vibrações, da corrente eléctrica absorvida, do binário electromagnético e também, da análise espectral da componente alternada do módulo do Vector de *Park* (EPVA). Estes resultados foram, por sua vez, comparados de forma a avaliar a sensibilidade de cada método no diagnóstico das referidas avarias.

## Palavras-chave

Diagnóstico de avarias, rolamentos, motores eléctricos, EPVA.

## 1. Introdução

O motor de indução trifásico é a máquina eléctrica mais utilizada na indústria para a produção de força motriz. Este tipo de motor possui uma posição cimeira, quase exclusiva, na conversão de energia eléctrica em energia mecânica, sendo responsável por cerca de 90% da energia eléctrica consumida na alimentação de motores eléctricos. Os trabalhos publicados sobre a fiabilidade de motores eléctricos, revelam que os rolamentos constituem a área mais afectada pela ocorrência de avarias em motores de indução trifásicos [1].

Em 1998, foram apresentados os resultados de um estudo estatístico referente à fiabilidade de motores eléctricos de tensão elevada, utilizados em plataformas petrolíferas, indústrias petroquímicas e refinarias [2]. Tal como era esperado, os resultados deste estudo revelaram que aproximadamente 52% das avarias ocorridas se manifestaram nos rolamentos, 25 % nos enrolamentos do estator e 6 % no rotor. Assim, a partir da apreciação destes resultados, justifica-se a importância do desenvolvimento de um estudo mais pormenorizado no

diagnóstico de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos.

Na secção 2 é apresentada uma abordagem analítica relativa às técnicas de diagnóstico utilizadas nos testes laboratoriais.

Na secção 3 expõem-se, para cada tipo de avaria considerado, os resultados experimentais obtidos através dos métodos de diagnóstico anteriormente referidos.

Na secção 4 são apresentadas as conclusões gerais respeitantes ao desenvolvimento do trabalho a que se refere este artigo.

## 2. Métodos de Diagnóstico

### A. Análise Espectral de Vibrações

O rolamento é constituído por quatro elementos; quando colocado em movimento, cada elemento gera uma frequência de resposta própria. Estas quatro frequências naturais ( $f_n$ ) são definidas como: frequência do anel externo, frequência do anel interno, frequência da gaiola e frequência dos corpos rolantes.

Estas frequências dependem da geometria do rolamento, do número de corpos rolantes e da velocidade de rotação do rolamento.

Os dados geométricos mais relevantes são ilustrados na Fig. 1.

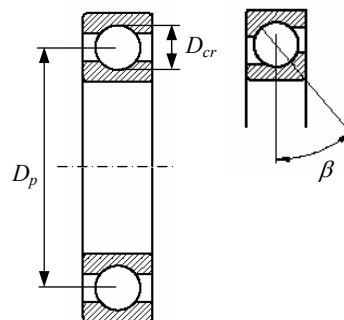


Fig. 1. Geometria dos elementos do rolamento.

Para o caso mais comum, em que a pista interior roda e a exterior está fixa, as diferentes frequências típicas (e seus múltiplos inteiros) são obtidas através das Equações (1) a (4) [3].

$$\text{Anel externo (Hz): } f_{bor} = \frac{N_{cr}}{2} n \left( 1 - \frac{D_{cr}}{D_p} \cos \beta \right) \quad (1)$$

$$\text{Anel interno (Hz): } f_{bir} = \frac{N_{cr}}{2} n \left( 1 + \frac{D_{cr}}{D_p} \cos \beta \right) \quad (2)$$

$$\text{Corpos rolantes (Hz): } f_{bs} = \frac{D_p}{2D_{cr}} n \left( 1 - \left( \frac{D_{cr}}{D_p} \cos \beta \right)^2 \right) \quad (3)$$

$$\text{Gaiola (Hz): } f_{fi} = \frac{n}{2} \left( 1 - \frac{D_{cr}}{D_p} \cos \beta \right) \quad (4)$$

onde:

- $n$  velocidade de rotação do veio (Hz);
- $D_p$  diâmetro primitivo (mm);
- $N_{cr}$  número de corpos rolantes;
- $\beta$  ângulo de contacto (graus);
- $D_{cr}$  diâmetro do corpo rolante (mm).

### B. Análise da corrente eléctrica estatórica

Em [4] e [5] demonstra-se a aplicabilidade da análise espectral da corrente eléctrica no diagnóstico de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos. Nos mesmos trabalhos refere-se que a presença de anomalias nos rolamentos de motores de indução trifásicos se caracteriza pela existência de componentes espectrais específicas, relativas à corrente eléctrica de alimentação do motor, cujas frequências poderão ser determinadas através de:

$$f_{sc} = |f_s \pm kf_n| \quad (5)$$

onde  $f_s$  representa a componente fundamental da corrente eléctrica de alimentação do motor (Hz) e  $k = 1, 2, 3, \dots$

### C. Análise do binário electromagnético

Partindo da expressão geral do binário electromagnético de um motor de indução trifásico com  $p$  pares de pólos:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p I_m \left\{ \underline{\psi}_s^* \times \underline{i}_s \right\} \quad (6)$$

considere-se:

$$\underline{\psi}_s = \left| \underline{\psi}_s \right| \exp[j(\omega_s t + \alpha_i)] \quad (7)$$

$$\underline{i}_{s,avaria} = \left| \underline{i}_{s,avaria} \right| \exp[j(\omega_{avaria} t + \alpha_{avaria})] \quad (8)$$

sendo:

$T_{em}$	binário electromagnético desenvolvido pelo motor [Nm];
$p$	número de pares de pólos;
$\underline{\psi}_s$	fator espacial do termo fundamental do fluxo estatórico do motor;
$\underline{i}_s$	fator espacial do termo fundamental da corrente de alimentação do motor;
$\underline{i}_{s,avaria}$	fator espacial da corrente eléctrica resultante da presença de anomalias no rolamento;
$\alpha_i$	desfasamento do fator espacial do harmónico de ordem $i$ da corrente de alimentação do motor;
$\alpha_{avaria}$	desfasamento do fator espacial da corrente eléctrica resultante da presença de anomalias no rolamento;
$\omega_s$	velocidade angular da corrente eléctrica de alimentação [rad/s];
$\omega_{avaria}$	velocidade angular da corrente eléctrica resultante da presença de anomalias no rolamento [rad/s].

Atendendo apenas ao termo fundamental do fluxo estatórico do motor, vem:

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} p \left| \underline{\psi}_s \right| \left| \underline{i}_{s,avaria} \right| I_m \left\{ \exp[j(-\omega_s t - \alpha_i)] \times \right. \\ &\quad \left. \exp[j(\omega_{avaria} t + \alpha_{avaria})] \right\} \\ &= \frac{3}{2} p \left| \underline{\psi}_s \right| \left| \underline{i}_{s,avaria} \right| I_m \left\{ \exp[j(\omega_{avaria} - \omega_s) t + \right. \\ &\quad \left. \alpha_{avaria} - \alpha_i] \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

Efectuando os produtos dos termos ter-se-á:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \left| \underline{\psi}_s \right| \left| \underline{i}_{s,avaria} \right| \sin[(\omega_{avaria} - \omega_s) t + \alpha_{avaria} - \alpha_i] \quad (10)$$

A partir da Equação (5) e da relação entre a velocidade angular e a frequência, ter-se-á:

$$\omega_{avaria} = \omega_s \pm 2\pi k f_n \quad (11)$$

Substituindo a Equação (11) na Equação (10), vem:

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} p \left| \underline{\psi}_s \right| \left[ \left| \underline{i}_{s,avaria+k} \right| \sin(2\pi k f_n t + \alpha_{avaria} - \alpha_i) + \right. \\ &\quad \left. + \left| \underline{i}_{s,avaria-k} \right| \sin(-2\pi k f_n t + \alpha_{avaria} - \alpha_i) \right] \quad (12) \end{aligned}$$

Considerando  $\beta = \alpha_{avaria} - \alpha_i$ , virá:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \left| \underline{\psi}_s \right| \left[ \left| \underline{i}_{s,avaria,k} \right| \sin(2\pi k f_n t + \beta) \right] \quad (13)$$

Analisando a Equação (13) verifica-se que as frequências introduzidas pelas avarias nos rolamentos no binário electromagnético são dadas por:

$$f_t = k \times f_n \quad (14)$$

representando  $f_n$  as frequências naturais de vibração que

foram anteriormente referidas nas Equações (1) a (4) e  $k = 1, 2, 3, \dots$

#### D. Extend Park's Vector Approach (EPVA)

Nesta secção aborda-se a análise espectral da componente alternada do módulo do Vector de *Park* da corrente eléctrica estatórica no diagnóstico de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos. Far-se-á de seguida uma breve exposição teórica, baseada em [6].

As componentes do Vector de *Park* da corrente eléctrica, em função da corrente de alimentação  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$ , são dadas por:

$$i_D = (\sqrt{2}/\sqrt{3}) \times i_A - (1/\sqrt{6}) \times i_B - (1/\sqrt{6}) \times i_C \quad (15)$$

$$i_Q = (1/\sqrt{2}) \times i_B - (1/\sqrt{2}) \times i_C \quad (16)$$

Em situação de funcionamento normal, isto é, na ausência de defeitos, as componentes do Vector de *Park* da corrente eléctrica serão dadas por:

$$i_D = (\sqrt{6}/2) \times I_M \cos(\omega_s t) \quad (17)$$

$$i_Q = (\sqrt{6}/2) \times I_M \sin(\omega_s t) \quad (18)$$

onde:

$I_M$  valor máximo da corrente eléctrica do sistema de alimentação trifásico [A];

$\omega_s$  frequência angular relativa ao sistema de alimentação [rad/s];

$t$  tempo [s].

A representação correspondente a estas equações paramétricas é uma circunferência centrada na origem das coordenadas. Nestas condições, o módulo do Vector de *Park* da corrente eléctrica é constante.

Por sua vez, a existência de avarias nos rolamentos reflecte-se no espectrograma da corrente eléctrica absorvida pelo motor através do aparecimento de componentes espectrais específicas, nomeadamente aquelas associadas às frequências  $(f_s - k \times f_n)$  e  $(f_s + k \times f_n)$  (Equação (5)).

Considere-se, então, a presença de avarias nos rolamentos. As correntes eléctricas das três fases de alimentação de um motor de indução trifásico são dadas pelas expressões:

$$i_A = i_f \cos(\omega_s t - \alpha) + i_{dl} \cos(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l) + i_{dr} \cos(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r) \quad (19)$$

$$i_B = i_f \cos(\omega_s t - \alpha - 2\pi/3) + i_{dl} \cos(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l - 2\pi/3) + i_{dr} \cos(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r - 2\pi/3) \quad (20)$$

$$i_C = i_f \cos(\omega_s t - \alpha + 2\pi/3) + i_{dl} \cos(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l + 2\pi/3) + i_{dr} \cos(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r + 2\pi/3) \quad (21)$$

onde:

$i_f$  valor máximo do termo fundamental da corrente eléctrica de alimentação do motor, quando na presença de avaria no rolamento [A];

$i_{dl}$  valor máximo da componente espectral da corrente eléctrica absorvida pelo motor associada à frequência  $|f_s - k \times f_n|$  [A];

$i_{dr}$  valor máximo da componente espectral da corrente eléctrica absorvida pelo motor associada à frequência  $|f_s + k \times f_n|$  [A];

$\alpha$  fase inicial do termo fundamental da corrente eléctrica de alimentação do motor [rad];

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

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

$\omega_n$  frequência angular natural [rad/s].

De acordo com as equações anteriores, as componentes do Vector de *Park* da corrente eléctrica serão dadas por:

$$i_D = (\sqrt{3}/2) [i_f \cos(\omega_s t - \alpha) + i_{dl} \cos(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l) + i_{dr} \cos(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r)] \quad (22)$$

$$i_Q = (\sqrt{3}/2) [i_f \sin(\omega_s t - \alpha) + i_{dl} \sin(\omega_s t - \omega_n t - \beta_l) + i_{dr} \sin(\omega_s t + \omega_n t - \beta_r)] \quad (23)$$

Nestas condições, o módulo do Vector de *Park* da corrente eléctrica estatórica é dado por:

$$\begin{aligned} |i_D + j i_Q|^2 = & (3/2) (i_f^2 + i_{dl}^2 + i_{dr}^2) + \\ & + 3i_f i_{dl} \cos(\omega_n t - \alpha + \beta_l) + \\ & + 3i_f i_{dr} \cos(\omega_n t + \alpha - \beta_r) + \\ & + 3i_{dl} i_{dr} \cos(2\omega_n t - \beta_r + \beta_l) \end{aligned} \quad (24)$$

Analisando a Equação (24) verifica-se que as frequências introduzidas pelas avarias nos rolamentos no EPVA são dadas por:

$$f_{EPVA} = k \times f_n \quad (25)$$

representando  $f_n$  as frequências naturais de vibração que foram anteriormente referidas nas Equações (1) a (4) e  $k = 1, 2, 3, \dots$

### 3. Resultados Experimentais

O motor no qual incidiram os estudos referentes às avarias nos rolamentos é um motor de indução tetrapolar, de 3 kW de potência nominal (estipulada), com um rotor do tipo gaiola de esquilo. Os rolamentos do motor utilizado para os ensaios, são rolamentos de esferas do tipo 6308 e 6206.

Os resultados experimentais foram obtidos pela análise espectral das vibrações, da corrente eléctrica

estatística, do binário electromagnético e, também, da componente alternada do módulo do Vector de *Park*.

Os primeiros ensaios foram obtidos com três rolamentos que ostentavam furos radiais de Ø8 mm, Ø5 mm e Ø2 mm no anel externo do rolamento (Fig. 2). A forma como esta avaria foi artificialmente introduzida é semelhante à descrita em [4] e [7].

A análise de vibrações é a primeira a ser analisada. Na Fig. 3 é apresentado um espectrograma das vibrações, correspondente ao funcionamento do motor com um furo de 8 mm no anel externo do rolamento, em comparação com o espectrograma relativo à situação de ausência de avaria. As componentes espectrais mais relevantes são indicadas na Tabela I. Como a avaria está localizada no anel externo, as componentes espectrais associadas à avaria são obtidas a partir da Equação (1). Na Fig. 3 é possível visualizar o aumento significativo de algumas componentes espectrais associadas à avaria, nomeadamente para  $k = 6, 7$  e  $10$ .

Na Fig. 4 ilustram-se os resultados obtidos para a análise de vibrações, relativos ao funcionamento do motor com um furo de 8 mm, 5 mm e 2 mm de diâmetro, no anel externo de um dos rolamentos, em comparação com a situação de ausência de avaria.

Verifica-se uma tendência crescente da amplitude das componentes espectrais do espectrograma das vibrações associadas à avaria, com a extensão da mesma.

O espectrograma da corrente eléctrica estatística para o mesmo nível de severidade da avaria do rolamento, em comparação com a situação de ausência de avaria, é ilustrado na Fig. 5. As componentes espectrais mais relevantes são indicadas na Tabela II.

É patente a maior dificuldade em identificar as componentes espectrais associadas à avaria, do termo fundamental do sistema de alimentação do motor (50 Hz). No estado mais incipiente da avaria (furo de 2 mm no anel externo do rolamento), as componentes espectrais associadas apresentam amplitudes muito reduzidas, o que dificulta a sua detecção.

Na Fig. 6 é apresentado o espectrograma do binário electromagnético, correspondente ao funcionamento do



Fig. 2. Rolamentos com furos radiais de Ø8 mm, Ø5 mm e Ø2 mm no anel externo.

TABELA I. – Frequência das componentes espectrais, calculadas através da Equação (1).

$f_s = 50 \text{ Hz}; n = 1465 \text{ rpm}; f_{bor} = 70.6 \text{ Hz}$				
$k$	6	7	10	
Frequência (Hz)	423.7	494.3	706.2	

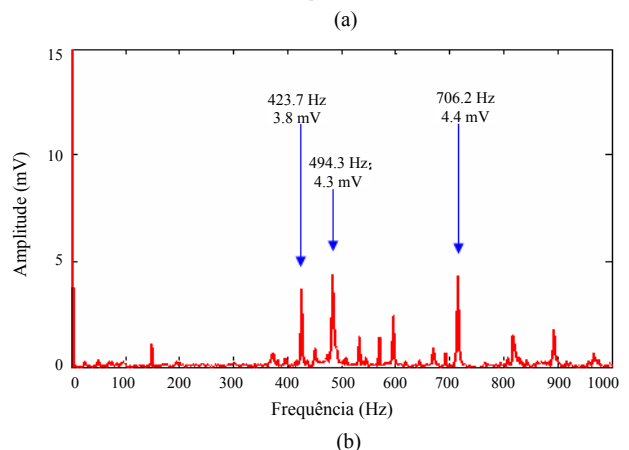
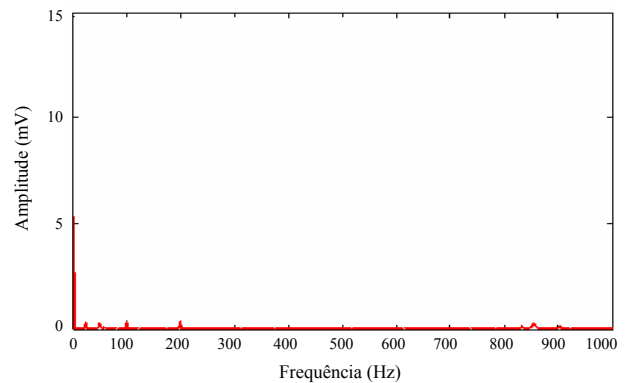


Fig. 3. Análise espectral das vibrações correspondente ao funcionamento do motor à plena carga: (a) ausência de avaria; (b) furo de 8 mm no anel externo do rolamento.

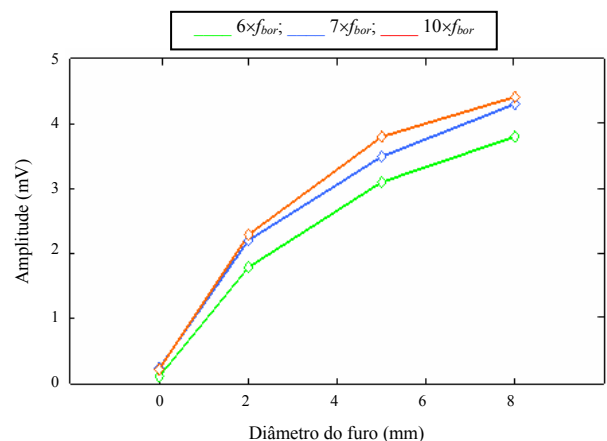
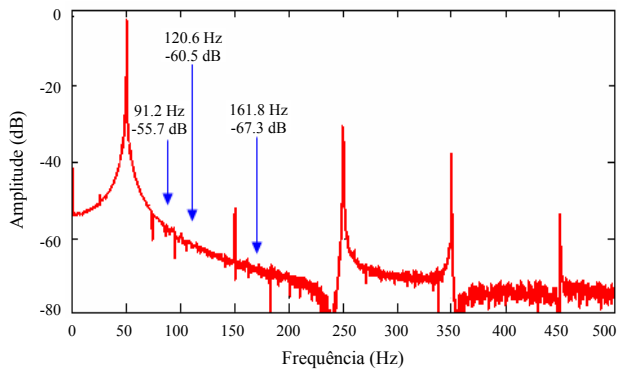


Fig. 4. Evolução das amplitudes de cada componente espectral das vibrações associada à avaria em função do diâmetro do furo realizado no anel externo do rolamento, para a situação de funcionamento à plena carga.

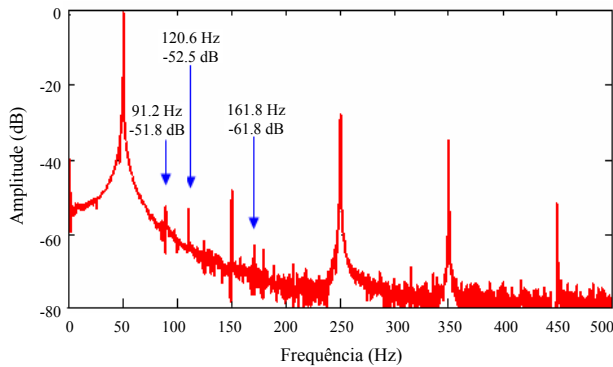
motor com a avaria referida anteriormente, em comparação com o espectrograma relativo à situação de ausência de avaria. As componentes espectrais mais relevantes são indicadas na Tabela III.

TABELA II. – Frequência das componentes espectrais, calculadas através da Equação (5).

$f_s = 50 \text{ Hz}; n = 1465 \text{ rpm}; f_{bor} = 70.6 \text{ Hz}$				
$k$	-2	+1	-3	
Frequência (Hz)	91.2	120.6	161.8	



(a)



(b)

Fig. 5. Análise espectral da corrente eléctrica estática correspondente ao funcionamento do motor à plena carga: (a) ausência de avaria; (b) furo de 8 mm no anel externo do rolamento.

O espectrograma do binário electromagnético é análogo ao da corrente eléctrica estática, apresentando as mesmas dificuldades para estados mais incipientes da avaria.

A assinatura do EPVA para o mesmo nível de severidade da avaria do rolamento, em comparação com a situação de ausência de avaria, é ilustrada na Fig. 7. As componentes espectrais mais relevantes são indicadas na Tabela IV.

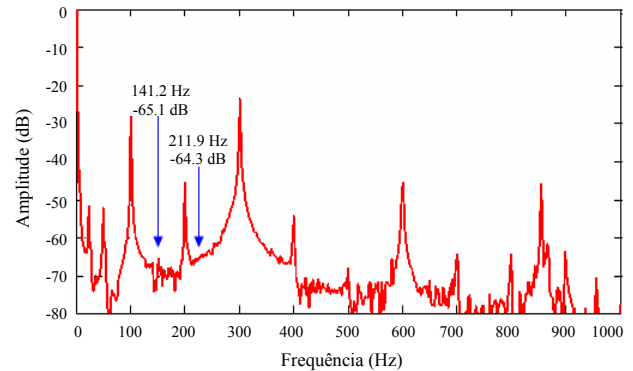
Comparando os resultados obtidos através deste método de diagnóstico, com aqueles fornecidos pela análise espectral da corrente eléctrica de alimentação do motor, do binário electromagnético e até mesmo das vibrações é evidente a facilidade com que as componentes espectrais associadas a este tipo de defeito se encontram destacadas no espectrograma proporcionado por esta nova estratégia de diagnóstico.

Na Fig. 8 ilustram-se os resultados obtidos para o EPVA, relativos ao funcionamento do motor com um furo de 8 mm, 5 mm e 2 mm de diâmetro, no anel externo de um dos rolamentos, em comparação com a situação de ausência de avaria.

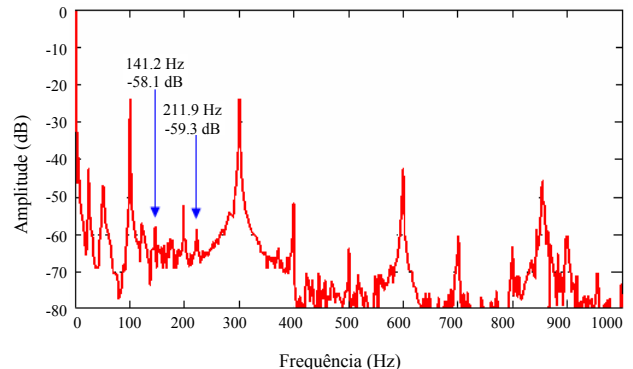
Verifica-se uma tendência crescente da amplitude das componentes espectrais da assinatura do EPVA associadas à avaria, com a extensão da mesma, muito

TABELA III. – Frequência das componentes espectrais, calculadas através da Equação (14).

$f_s = 50 \text{ Hz}; n = 1465 \text{ rpm}; f_{bor} = 70.6 \text{ Hz}$		
$k$	2	3
Frequência (Hz)	141.2	211.9



(a)



(b)

Fig. 6. Análise espectral do binário electromagnético correspondente ao funcionamento do motor à plena carga: (a) ausência de avaria; (b) furo de 8 mm no anel externo do rolamento.

embora, menos pronunciada do que na análise das vibrações (Fig. 4).

Neste trabalho foi ainda implementada uma nova metodologia para introduzir as avarias nos rolamentos, de modo a que as avarias testadas reflectissem melhor as reais situações de funcionamento.

Tal metodologia possibilitou aceder à pista interna e externa do rolamento e, assim, implementar as avarias com o auxílio de uma estrutura especificamente concebida para o efeito.

Uma dessas avarias corresponde à situação causada pela vibração estática (*false brinelling*).

O *brinelling* corresponde à formação de indentações na pista do rolamento devido à sobrecarga estática. É rara a ocorrência deste tipo de avaria nos motores eléctricos, no entanto a forma *false brinelling* ocorre mais frequentemente. Este dano pode ocorrer quando o rolamento é exposto a vibrações enquanto o motor não está em funcionamento. O *false brinelling* pode mesmo aparecer durante o transporte do rolamento antes de ser instalado.

Para simular a avaria de *false brinelling*, efectuaram-se três indentações, distribuídas com o mesmo espaçamento que o das esferas, no anel interno e externo dos dois rolamentos.

TABELA IV. – Frequência das componentes espectrais, calculadas através da Equação (25).

$f_s = 50 \text{ Hz}; n = 1465 \text{ rpm}; f_{bor} = 70.6 \text{ Hz}$			
$k$	1	2	5
Frequência (Hz)	70.6	141.2	353.1

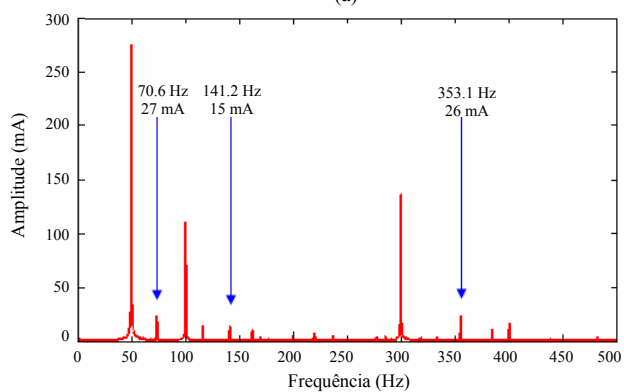
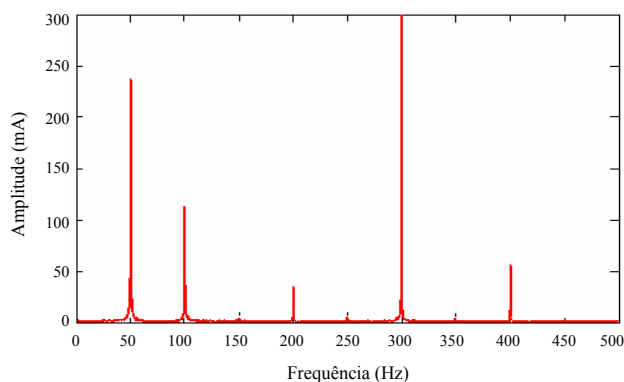


Fig. 7. Assinatura do EPVA correspondente ao funcionamento do motor à plena carga: (a) ausência de avaria; (b) furo de 8 mm no anel externo do rolamento.

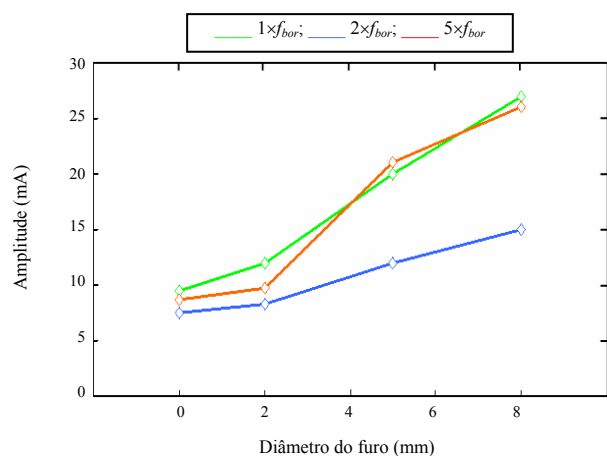


Fig. 8. Evolução das amplitudes de cada componente espectral da assinatura do EPVA associada à avaria em função do diâmetro do furo realizado no anel externo do rolamento, para a situação de funcionamento à plena carga.

A assinatura do EPVA para esta avaria apresenta-se na Fig. 9.

Como foram realizadas indentações nos dois anéis de ambos os rolamentos, verifica-se o aparecimento de frequências associadas à avaria no anel interno e externo dos dois rolamentos. Na Tabela V são apresentadas as frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA associadas à avaria no anel externo e, na Tabela VI, são apresentadas as frequências correspondentes às componentes espectrais da assinatura do EPVA associadas à avaria no anel interno.

TABELA V. – Frequência das componentes espectrais, calculadas através da Equação (25).

$f_s = 50 \text{ Hz}; n = 1473 \text{ rpm}; f_{bor} = 71.0 \text{ Hz (rol. 1)}; f_{bor} = 81.7 \text{ Hz (rol. 2)}$			
$k$	1	2	5
Frequência (Hz)			
rolamento 1	71.0	142.0	355.0
rolamento 2	81.7	163.3	408.3

TABELA VI. – Frequência das componentes espectrais, calculadas através da Equação (25).

$f_s = 50 \text{ Hz}; n = 1473 \text{ rpm}; f_{bir} = 125.4 \text{ Hz (rol. 1)}; f_{bir} = 136.3 \text{ Hz (rol. 2)}$	
$k$	1
Frequência (Hz)	
rolamento 1	125.4
rolamento 2	136.3

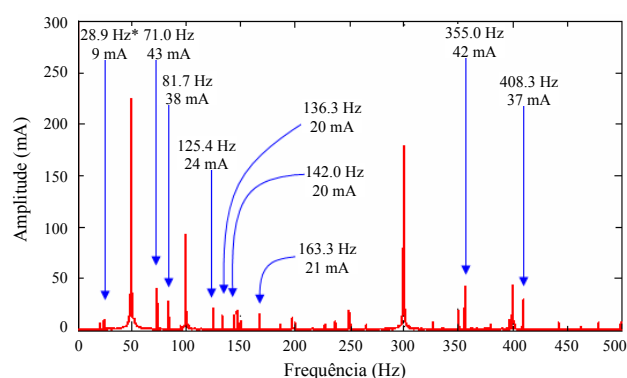


Fig. 9. Assinatura do EPVA, para o caso do funcionamento do motor, com três indentações no anel externo e interno dos dois rolamentos, à plena carga.

Os resultados obtidos colocam em evidência o aparecimento de outra componente espectral, que nos outros ensaios se apresentava com amplitudes reduzidas, isto é, a frequência  $|50 - f_{sc}|$ , o que permite a identificação deste tipo de avaria.

Qualquer componente espectral que exista no espectrograma da corrente eléctrica a uma frequência  $f_x$ , corresponderá, na assinatura do EPVA, a uma componente espectral a uma frequência dada pela diferença entre a frequência do termo fundamental da corrente eléctrica de alimentação do motor e a frequência  $f_x$ . Por exemplo, uma componente espectral existente no espectrograma da corrente eléctrica absorvida pelo motor, associada a uma frequência de 20 Hz, corresponderá na assinatura do EPVA, a uma componente espectral associada a uma frequência de  $50 - 20 = 30 \text{ Hz}$ . É por este motivo que está referenciada na Fig. 9 a frequência  $|50 - f_{sc}| = 28.9 \text{ Hz}^*$ .

A passagem de corrente eléctrica nos rolamentos devido à utilização de variadores electrónicos de velocidade, poderá conduzir à formação de estrias (*fluting*) nas pistas dos rolamentos.

Assim, com o auxílio de uma ferramenta concebida para o efeito, foi possível marcar as estrias no anel interno do rolamento. Deste modo é possível simular o dano referido anteriormente, denominado *fluting*.



TABELA VII. – Frequência das componentes espectrais, calculadas através da Equação (25).

$f_s = 50 \text{ Hz}; n = 1471 \text{ rpm}; f_{bir} = 125.2 \text{ Hz}$		
$k$	1	3
Frequência (Hz)	125.2	375.7

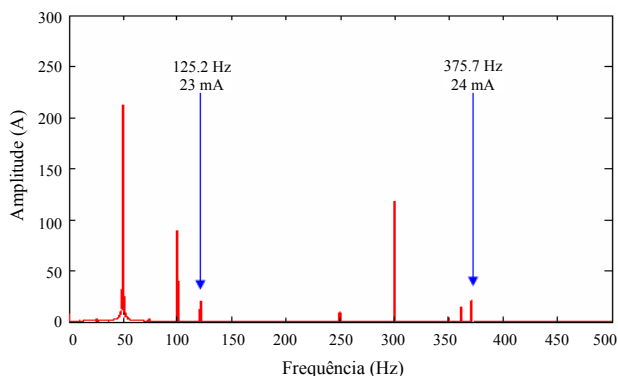


Fig. 10. Assinatura do EPVA, para o caso do funcionamento do motor com estrias no anel interno do rolamento, à plena carga e ligação em triângulo.

Na Fig. 10 é ilustrada a assinatura do EPVA para o caso em que foram introduzidas estrias no anel interno de um dos rolamentos. As frequências das componentes espectrais mais relevantes da assinatura do EPVA associadas à avaria estão indicadas na Tabela VII.

Como as indentações introduzidas se referem ao anel interno, verifica-se o aparecimento de frequências associadas à avaria nesse anel.

## 5. Conclusões

O trabalho apresentado neste artigo refere-se ao diagnóstico de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos.

Foram efectuados diversos ensaios com diferentes tipos de avarias nos rolamentos e registados os principais resultados obtidos pelos métodos de diagnóstico baseados na análise espectral das vibrações, da corrente eléctrica, do binário electromagnético e da componente alternada do módulo do Vector de Park.

A análise espectral de vibrações constitui o método de diagnóstico tradicionalmente utilizado, com vista à detecção de avarias nos rolamentos dos motores de indução trifásicos. Comparativamente aos outros métodos de diagnóstico analisados, a análise espectral da vibração permite diagnosticar a avaria num estado mais precoce de desenvolvimento.

Os resultados obtidos pela análise espectral da corrente eléctrica estatórica e do binário electromagnético são muito semelhantes, apresentando-se pouco sensíveis

ao estado incipiente da avaria ou da sua localização no anel interno do rolamento.

A análise espectral do binário electromagnético tem uma limitação prática, designadamente, a dificuldade na implementação de um adequado sistema de medida.

Foi apresentada uma nova estratégia de diagnóstico de avarias nos rolamentos dos motores de indução trifásicos, que consiste na análise espectral da componente alternada do módulo do Vector de Park da corrente eléctrica. A referida estratégia foi aplicada com sucesso no diagnóstico de avarias dos rolamentos. A ocorrência deste tipo de avaria manifesta-se, no espectrograma da componente alternada do módulo do Vector de Park, através do aparecimento de componentes espectrais específicas, associadas à frequência  $k \times f_n$ . Em alguns tipos de avarias, designadamente *false brinelling*, surge uma nova componente espectral associada à frequência  $|50 - f_{sc}|$ , o que permite caracterizar este tipo de avaria.

O EPVA apresenta-se mais sensível ao estado incipiente da avaria, do que a análise espectral da corrente eléctrica.

Em conclusão, o EPVA apresenta-se como um método alternativo, sem a necessidade de aceder ao motor eléctrico, situação esta, que em determinadas aplicações práticas inviabiliza, por completo, o recurso à utilização da análise espectral das vibrações.

## Referências

- [1] A. J. M. Cardoso, “Diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos”, Coimbra Editora, 1991.
- [2] O. V. Thorsen and M. Dalva, “Failures identification and analysis for high voltage induction motors in petrochemical industry”, in *Conf. Record of the Industry Applications Society Annual Meeting*, St. Louis, MO, pp. 810-818, October 12-16, 1998.
- [3] T. Harris, “Rolling bearing analysis”, 4<sup>th</sup> ed., Wiley, New York, 2001.
- [4] R. R. Schoen, T. G. Habetler e R. G. Bartheld, “Motor bearing damage detection using stator current monitoring”, *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 31, n° 6, pp. 1274-1279, Nov./Dec., 1995.
- [5] Ramzy R. Obaid, Thomas G. Habetler e Jason R. Stack, “Stator Current Analysis for Bearing Detection in Induction Motors”, *Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Atlanta, USA, pp.182-187, August, 2003.
- [6] S. M. A. Cruz and A. J. M. Cardoso, “Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by Extended Park’s Vector Approach”, *Electric Machines and Power Systems*, vol. 28, n° 4, pp. 289-299, 2000.
- [7] Francisco R. Faya, M. F. Cabanas, Manuel G. Melero, Gonzalo A. Orcajo, Carlos H. Rojas, “Electromagnetic torque as a new method for on-line induction motor rolling-element bearing damage detection”, in *Proc. ICEM 98 International Conference on Electrical Machines*, Istanbul, Turkey, pp. 1866-1871, September, 1998.