

Mário Jorge Mendes Gonçalves

# TÉCNICAS AVANÇADAS DE PROCESSAMENTO DE SINAL NO DIAGNÓSTICO DE AVARIAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Dissertação de Mestrado

Setembro de 2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Universidade de Coimbra

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Técnicas avançadas de processamento de sinal no diagnóstico de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos**

Mário Jorge Mendes Gonçalves

Membros do Júri:

Presidente: Professor Doutor Henrique José Almeida da Silva

Orientador: Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz

Vogal: Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira

Coimbra, Setembro de 2015





O desenvolvimento deste trabalho tornou-se mais fácil graças ao apoio e à colaboração de várias pessoas. Tanto ao nível técnico como ao nível pessoal, foram várias as ações e as palavras que me sensibilizaram e me fizeram acreditar na realização deste trabalho. Como Platão dizia “*O que faz andar o barco não é a vela enfunada, mas o vento que não se vê.*”.

Em primeiro lugar, quero expressar o meu particular agradecimento ao Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz pelo empenho, disponibilidade e orientação científica demonstradas durante a realização desta dissertação.

Quero agradecer ao Professor Doutor Renato Creppe pela motivação e cooperação manifestadas no decorrer do trabalho, quer durante a sua estadia em Portugal quer à distância, no Brasil.

À minha família, em especial aos meus pais e ao meu irmão, agradeço todo o apoio, carinho e compreensão demonstrados durante esta fase importante da minha vida.

Aos meus amigos, em especial à malta do laboratório, destacando o Emanuel Marques, Tiago Róia, Sérgio Júnior, Pedro Gonçalves, Hazem Hadla, Diogo Cavaleiro, Ricardo Branco, Álvaro Oliveira e André Gonçalves, quero agradecer o companheirismo e solidariedade manifestadas no decorrer do trabalho.





Na atualidade, os motores de indução assumem um papel fulcral na indústria. A implementação de sistemas de diagnóstico de avarias neste tipo de máquina tem registado uma forte adesão neste setor, garantindo uma maior vigilância e fiabilidade da atividade do motor e de todo o processo produtivo onde este se encontra integrado.

Tendo como base a análise de sinais de vibração da carcaça do motor e de sinais elétricos (corrente de alimentação, potências ativa e reativa instantâneas do motor), o trabalho desta dissertação consistiu na comparação de resultados da aplicação de várias técnicas de processamento de sinal, nos domínios da frequência e tempo-frequência, na deteção de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos.

No domínio da frequência foram utilizadas, além da transformada rápida de Fourier, a transformada de Hilbert, o operador de energia Teager-Kaiser e a transformada Chirp-Z. No domínio do tempo-frequência foram aplicadas a transformada de Fourier de curta duração, a distribuição de Wigner-Ville e a transformada de onduleta.

Foram analisados dois tipos de avaria nos rolamentos, caracterizando-se cada tipo pela localização – avarias nos anéis externo e interno dos rolamentos. De modo a identificar a forma como a evolução da avaria se manifesta, foram introduzidas avarias nos rolamentos respeitantes a dois níveis de severidade. Todos estes ensaios foram realizados com o motor a funcionar sob três regimes de carga (vazio, meia carga e plena carga).

De acordo com análise realizada aos espetros, espectrogramas e escalogramas obtidos, foram retiradas conclusões relativas à fiabilidade das técnicas implementadas, tendo em conta o tipo de sinal processado e a avaria analisada.

**Palavras-chave:** rolamento, motor de indução, técnicas de processamento de sinal, diagnóstico de avarias.





Nowadays, induction motors play a major role in industry. The implementation of fault diagnosis systems on this type of machines has been grown on industrial facilities, providing a more reliable and controlled way of motor's activity and production processes in where the motor could be associated.

Based on the analysis of vibration signals, acquired from the housing motor, and electrical signals (supply motor current, instantaneous active and reactive powers), this thesis compared multiple techniques approaches, in frequency and time-frequency domains, in detection of rolling bearing faults in induction motors.

The signal processing techniques used in frequency analysis were, in addition to fast Fourier transform, the Hilbert transform, the Teager-Kaiser energy operator and the Chirp-Z transform. In time-frequency analysis were used the short-time Fourier transform, the Wigner-Ville distribution and the wavelet transform.

Two types of faults were analyzed, being each type characterized by his location – outer and inner race bearing faults. In a way to identify how the fault expresses and evolves, faults with two severity levels were tested. All tests were performed with the motor rotating under three load conditions (no load, half load, full load).

According to the analysis done to the obtained spectrums, spectrograms and scalograms, several conclusions were presented in order to choose the best technique, considering the nature of the signal and the fault analyzed.

**Keywords: bearing, induction motor, signal processing techniques, fault diagnosis.**





<b>Agradecimentos .....</b>	<b>i</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>v</b>
<b>Índice .....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de símbolos .....</b>	<b>xvi</b>
<b>Abreviaturas .....</b>	<b>xx</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Motivação e objetivos de dissertação.....	2
<b>2. Técnicas Avançadas de Processamento de Sinal Aplicadas no Diagnóstico de Avarias .....</b>	<b>3</b>
2.1. Técnicas no domínio da frequência.....	3
2.1.1. Transformada rápida de Fourier .....	3
2.1.2. Transformada de Hilbert.....	4
2.1.3. Transformada Chirp-Z.....	5
2.1.4. Operador de energia Teager-Kaiser.....	6
2.2. Técnicas no domínio do tempo-frequência .....	6
2.2.1. Transformada de Fourier de curta duração.....	6
2.2.2. Distribuição de Wigner-Ville .....	8
2.3. Transformada de Onduleta .....	9
2.3.1. Transformada de Onduleta contínua .....	10
2.3.2. Transformada de Onduleta discreta.....	11
<b>3. Avarias em Rolamentos .....</b>	<b>15</b>
3.1. Tipos de avarias.....	15

3.2.	Deteção das avarias.....	17
3.2.1.	Análise dos sinais de vibração da carcaça do motor .....	17
3.2.2.	Análise dos sinais elétricos .....	17
<b>4.</b>	<b>Ensaio Experimentais .....</b>	<b>23</b>
4.1.	Descrição da montagem e do procedimento experimental .....	23
4.2.	Análise dos sinais de vibração da carcaça do motor.....	27
4.2.1.	Avaria no anel externo .....	27
4.2.2.	Avaria no anel interno .....	38
4.3.	Análise dos sinais elétricos .....	47
4.3.1.	Avaria no anel externo .....	47
4.3.2.	Avaria no anel interno .....	54
<b>5.</b>	<b>Conclusão e Trabalho Futuro.....</b>	<b>63</b>
5.1.	Conclusão.....	63
5.2.	Trabalho futuro .....	65
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE A – Análise dos sinais elétricos (funcionamento do motor à meia carga).....</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXO I – Características das máquinas elétricas utilizadas nas montagens laboratoriais ..</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO II – Características dos condicionadores de sinal.....</b>	<b>81</b>
	<b>ANEXO III – Funções das onduletas aplicadas na análise dos sinais.....</b>	<b>83</b>

Fig. 2.1 - Diagrama representativo do cálculo da CZT [13]. .....	5
Fig. 2.2 - Implementação do TKEO no domínio da frequência. ....	6
Fig. 2.3 - Decomposição do sinal, segundo a MRA, em 4 níveis. ....	13
Fig. 2.4 - Gama de frequências coberta pelos coeficientes, decomposição em 4 níveis. ....	13
Fig. 2.5 - Diagrama da decomposição do sinal em 3 níveis e respectivas gamas de frequência, utilizando o WPT. ....	14
Fig. 3.1 - Dimensões e elementos constituintes de um rolamento de esferas [45]. ....	15
Fig. 3.2 - Diagrama com os tipos, efeitos e manifestações das avarias em rolamentos [43]. ....	16
Fig. 4.1 – Diagrama representativo da montagem experimental. ....	23
Fig. 4.2 – Rolamentos com avaria: (a) furo de 2 mm no anel externo; (b) furo de 4 mm no anel interno. ....	24
Fig. 4.3 – Elementos constituintes do sistema de aquisição de sinais de vibração: (a) caixa com os condicionadores de sinal e filtros passa-baixo; (b) acelerômetro triaxial, fixado no MIT. ....	25
Fig. 4.4 – Setup experimental. ....	26
Fig. 4.5 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo z para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	28
Fig. 4.6 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo x para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	29
Fig. 4.7 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo z para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	30
Fig. 4.8 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo z para o funcionamento do MIT à plena carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	30

Fig. 4.9 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo $z$ para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	31
Fig. 4.10 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo $z$ para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	32
Fig. 4.11 - Espetrogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo $z$ , com introdução de avarias no anel externo do rolamento do lado do ventilador, aplicando a STFT: (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB.....	33
Fig. 4.12 - Espetrogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo $z$ , com introdução de avarias no anel externo do rolamento do lado do ventilador, aplicando a WVD: (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB.....	34
Fig. 4.13 - Escalogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo $z$ , com introdução de avarias no anel externo do rolamento do lado do ventilador, aplicando a CWT (onduleta <i>Morlet</i> ): (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB. ....	36
Fig. 4.14 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes na direção do eixo $z$ , utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio: (a) usando um rolamento saudável, (b) usando um rolamento com furo de 2 mm no anel externo do lado do ventilador. ....	37
Fig. 4.15 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo $z$ para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	38
Fig. 4.16 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo $x$ para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	39
Fig. 4.17 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo $x$ para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	40

Fig. 4.18 - Espetros representativos de sinais de vibração na direção do eixo $x$ para o funcionamento do MIT à plena carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.....	40
Fig. 4.19 - Espetros representativos de sinais de vibração na direção do eixo $x$ para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.....	41
Fig. 4.20 – Espetro representativo de sinais de vibração na direção do eixo $x$ para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando o TKEO. ....	42
Fig. 4.21 - Espetros representativos de sinais de vibração na direção do eixo $x$ para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.....	42
Fig. 4.22 - Espetrogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo $x$ , com introdução de avarias no anel interno do rolamento do lado do ventilador, aplicando a STFT: (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB. ....	43
Fig. 4.23 - Espetrogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo $x$ , com introdução de avarias no anel interno do rolamento do lado do ventilador, aplicando a WVD: (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB. ....	44
Fig. 4.24 - Escalogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo $x$ , com introdução de avarias no anel interno do rolamento do lado do ventilador, aplicando a CWT (onduleta <i>Morlet</i> ): (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB.....	45
Fig. 4.25 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes na direção do eixo $x$ , utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio: (a) usando um rolamento saudável, (b) usando um rolamento com furo de 2 mm no anel interno. ....	46
Fig. 4.26 - Espetros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	47

Fig. 4.27 - Espectros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.....	47
Fig. 4.28 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	48
Fig. 4.29 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	49
Fig. 4.30 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	49
Fig. 4.31 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	50
Fig. 4.32 - Espectrogramas da corrente de alimentação representativos da evolução da avaria no anel externo do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a STFT: (a) sem avaria; (b) com avaria de 2 mm; (c) com avaria de 4 mm, com escalas em dB. ....	50
Fig. 4.33 - Espectrogramas da corrente de alimentação representativos da evolução da avaria no anel externo do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a WVD: (a) sem avaria; (b) com avaria de 2 mm; (c) com avaria de 4 mm, com escalas em dB. ....	51
Fig. 4.34 - Espectrogramas representativos da evolução da avaria no anel externo do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a STFT: (a) sem avaria, potência ativa; (b) sem avaria, potência reativa; (c) com avaria de 2 mm, potência ativa; (d) com avaria de 2 mm, potência reativa; (e) com avaria de 4 mm, potência ativa; (f) com avaria de 4 mm, potência reativa; com escalas em dB.....	52
Fig. 4.35 - Escalogramas da corrente de alimentação do motor a funcionar em vazio, representativos da evolução da avaria no anel externo do rolamento do lado do ventilador, aplicando a CWT (onduleta <i>Morlet</i> ): (a) sem avaria; (b) com avaria de 2 mm; (c) com avaria de 4 mm; com escalas em dB. ....	53
Fig. 4.36 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes da corrente de alimentação, utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio: (a) usando um rolamento saudável; (b) usando um rolamento com furo de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador. ....	54

Fig. 4.37 - Espectros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	55
Fig. 4.38 - Espectros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	55
Fig. 4.39 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	56
Fig. 4.40 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	56
Fig. 4.41 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	57
Fig. 4.42 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT. ....	57
Fig. 4.43 - Espetrogramas da corrente de alimentação representativos da evolução da avaria no anel interno do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a STFT: (a) sem avaria; (b) com avaria de 2 mm; (c) com avaria de 4 mm, com escalas em dB. ....	58
Fig. 4.44 - Espetrogramas da corrente de alimentação representativos da evolução da avaria no anel interno do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a WVD: (a) sem avaria; (b) com avaria de 2 mm; (c) com avaria de 4 mm, com escalas em dB. ....	59
Fig. 4.45 - Espetrogramas representativos da evolução da avaria no anel interno do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a STFT: (a) sem avaria, potência ativa; (b) sem avaria, potência reativa; (c) com avaria de 2 mm, potência ativa; (d) com avaria de 2 mm, potência reativa; (e) com avaria de 4 mm, potência ativa; (f) com avaria de 4 mm, potência reativa; com escalas em dB. ....	59
Fig. 4.46 – Escalogramas de sinais de potência elétrica representativos da evolução da avaria no anel externo do rolamento do lado do ventilador, com o motor a funcionar em vazio, aplicando a CWT (onduleta <i>Morlet</i> ): (a) sem avaria, potência ativa, (b) sem avaria, potência reativa, (c) com avaria de	



2 mm, potência ativa, (d) com avaria de 2 mm, potência reativa, (e) com avaria de 4 mm, potência ativa, (f) com avaria de 4mm, potência reativa, com escalas em dB.....	60
Fig. 4.47 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes da corrente, utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio usando: (a) um rolamento saudável, (b) um rolamento com furo de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador.....	61
Fig. 4.48 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes da potência ativa, utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio usando: (a) um rolamento saudável, (b) um rolamento com furo de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador.....	62
Fig. 4.49 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes da potência reativa, utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio usando: (a) um rolamento saudável, (b) um rolamento com furo de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador.....	62

Tabela 1 – Percentagem de avarias, tendo em conta a sua origem, em motores de indução, comparação entre 3 estudos [2]. .....	1
Tabela 2 - Comparação entre diferentes métodos de análise no domínio do tempo-frequência [34]. .....	11
Tabela 3 – Frequências características de avarias nos anéis dos rolamentos para os diferentes sinais. ....	21
Tabela 4 – Dimensões dos rolamentos. ....	24
Tabela 5 - Velocidade e frequência mecânica de rotação do rotor aos vários regimes de carga. ....	27
Tabela 6 – Frequências características dos anéis externo e interno dos rolamentos para cada regime de carga. ....	27
Tabela 7 – Bandas de frequência, associadas aos coeficientes, obtidas através da decomposição do sinal em multiníveis. ....	35
Tabela 8 – Energia, e respetiva variação, correspondente aos coeficientes do sinal, para a situação presente na Fig. 4.14. ....	37
Tabela 9 - Energia, e respetiva variação, correspondente aos coeficientes do sinal, para a situação presente na Fig. 4.25. ....	46
Tabela 10 - Energia, e respetiva variação, correspondente aos coeficientes do sinal, para a situação presente na Fig. 4.36. ....	53

## Lista de símbolos

---

$a$	Parâmetro da escala das onduletas	
$a_{j0,k}$	Coefficientes de aproximação das onduletas	
$a(t)$	Amplitude do sinal resultante da Transformada de Hilbert	
$b$	Parâmetro do tempo das onduletas	
$c_{x,y}$	Coefficientes da Transformada de onduleta por pacotes	
$d_{j,k}$	Coefficientes de detalhe das onduletas	
$f$	Frequência	Hz
$f_b$	Frequência característica das esferas	Hz
$f_e$	Frequência de alimentação do motor	Hz
$f_i$	Frequência característica do anel interno	Hz
$f_o$	Frequência característica do anel externo	Hz
$f_r$	Frequência mecânica de rotação do rotor	Hz
$f_s$	Frequência de amostragem	Hz
$f_{BPO}$	Frequências características da avaria no anel externo, identificáveis nos sinais de vibração	Hz
$f_{BPI}$	Frequências características da avaria no anel interno, identificáveis nos sinais de vibração	Hz
$f_{iBPO}$	Frequências características da avaria no anel externo, identificáveis na corrente elétrica de alimentação	Hz
$f_{iBPI}$	Frequências características da avaria no anel interno, identificáveis na corrente elétrica de alimentação	Hz
$f_{pqBPO}$	Frequências características da avaria no anel externo, identificáveis nas potências ativa e reativa instantâneas	Hz

$f_{pqBPI}$	Frequências características da avaria no anel interno, Hz identificáveis nas potências ativa e reativa instantâneas	
$g[n]$	Filtro da onduleta	
$h$	Função da janela espectral utilizada na Transformada de Fourier de curta duração	
$h[n]$	Filtro de escala	
$i_d, i_q$	Componentes do vetor de Park da corrente elétrica de A alimentação do motor	
$i_{dl}$	Amplitude da componente espectral da corrente elétrica A absorvida pelo motor associada às frequências determinadas para o anel externo, $ f_e - k \cdot f_o $ , ou para o anel interno, $ f_e - k \cdot f_i \pm f_r $	
$i_{dr}$	Amplitude da componente espectral da corrente elétrica A absorvida pelo motor associada às frequências determinadas para o anel externo, $ f_e + k \cdot f_o $ , ou para o anel interno, $ f_e + k \cdot f_i \pm f_r $	
$i_f$	Amplitude do termo fundamental da corrente elétrica de A alimentação do motor	
$i_s$	Corrente elétrica de alimentação do motor	A
$\bar{i}_s$	Sinal analítico, da transformada de Hilbert, da corrente de alimentação do motor	
$i_{s,TKEO}$	Corrente elétrica de alimentação do motor resultante da A aplicação do operador de energia Teager-Kaiser	
$j$	Escala (ou nível de multiresolução) da onduleta	
$j_0$	Escala da banda das frequências mais baixas da onduleta	
$k$	Número inteiro positivo	
$m, n$	Número natural	

$p$	Potência ativa instantânea	W
$q$	Potência reativa instantânea	VAr
$t$	Tempo	s
$v_d, v_q$	Componentes do vetor de Park da tensão elétrica de alimentação do motor	V
$v_m$	Valor máximo da tensão elétrica do sistema de alimentação do motor	V
$w$	Função da janela espectral de <i>Hanning</i>	
$x[n]$	Sinal discreto	
$\bar{x}$	Sinal analítico da Transformada de Hilbert	
$A$	Valor inicial da Transformada Chirp-Z	
$B$	Número de blocos temporais da Transformada de Fourier de curta duração	
$D_B$	Diâmetro das esferas do rolamento	mm
$D_P$	Diâmetro primitivo do rolamento	mm
$J$	Número total de escalas da onduleta	
$M$	Número de pontos utilizados na Transformada Chirp-Z	
$N$	Número de amostras do sinal	
$N_b$	Número de esferas do rolamento	
$W$	Incremento da Transformada Chirp-Z	
$W_f$	Comprimento da janela espectral	
$W_n$	Número de janelas espectrais utilizadas no espectrograma	
$X[n]$	Transformada discreta de Fourier do sinal $x[n]$	
$Z_k$	Pontos do plano complexo utilizados na Transformada Chirp-Z	

$\alpha$	Fase inicial do termo fundamental da corrente elétrica de alimentação do motor	rad
$\beta$	Ângulo de contacto das esferas do rolamento	graus
$\beta_i$	Fase inicial da componente espectral da corrente elétrica absorvida pelo motor, associada às frequências determinadas para o anel externo, $ f_e - k \cdot f_o $ , ou para o anel interno, $ f_e - k \cdot f_i \pm f_r $	rad
$\beta_r$	Fase inicial da componente espectral da corrente elétrica absorvida pelo motor, associada às frequências determinadas para o anel externo, $ f_e + k \cdot f_o $ , ou para o anel interno, $ f_e + k \cdot f_i \pm f_r $	rad
$\theta$	Fase do sinal	rad
$\phi$	Função escala de uma onduleta	
$\psi$	Onduleta-mãe	
$\omega$	Frequência angular	rad/s
$\omega_e$	Frequência angular elétrica do sistema de alimentação	rad/s
$\omega_n$	Frequência angular natural	rad/s
$\omega_r$	Frequência angular elétrica de rotação do rotor	rad/s

CWD	<i>Choi-Williams Distribution</i> – Distribuição de Choi-Williams
CWT	<i>Continuous Wavelet Transform</i> – Transformada de Onduleta Contínua
CZT	<i>Chirp-Z Transform</i> – Transformada Chirp-Z
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> – Transformada Discreta de Fourier
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i> – Transformada de Onduleta Discreta
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada Rápida de Fourier
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i> – Arranjo de Portas Programável em Campo
MIT	Motor de Indução Trifásico
MRA	<i>Multiresolution Analysis</i> – Análise em Multiresolução
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i> – Análise da Assinatura da Corrente do Motor
NI	<i>National Instruments</i>
SG	<i>Scalogram</i> - Escalograma
STFT	<i>Short-Time Fourier Transform</i> – Transformada de Fourier de Curta Duração
TH	Transformada de Hilbert
TKEO	<i>Teager-Kaiser Energy Operator</i> – Operador de energia Teager-Kaiser
WPT	<i>Wavelet Packet Transform</i> – Transformada de Onduleta por Pacotes
WVD	<i>Wigner-Ville Distribution</i> – Distribuição de Wigner-Ville

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

O desenvolvimento de sistemas de diagnóstico de avarias para motores elétricos tem assumido um lugar de destaque na área da engenharia eletrotécnica. Dos vários tipos de motores elétricos existentes na atualidade destaca-se a utilização do motor de indução trifásico. Inventado em 1880 por Nikola Tesla, a sua utilização em acionamentos industriais, assim como em sistemas de perfuração e de bombagem, entre outros, é visível em larga escala. Ao nível industrial, mais de 90% dos motores elétricos utilizados são motores de indução trifásicos. A sua construção robusta aliada a uma fácil manutenção originam uma ótima relação custo-benefício.

Atualmente, a maior parte destes motores encontram-se inseridos em processos industriais, muitas vezes complexos que congregam diversos componentes. Estes processos em ambiente industrial decorrem, em muitos casos, em condições adversas ao funcionamento deste tipo de motores. Devido ao desgaste associado às condições e ao modo de funcionamento a que o motor se encontra sujeito, a ocorrência de avarias de natureza mecânica ou elétrica pode causar uma paragem inesperada do processo, originando custos associados à manutenção e à paragem da produção potencialmente elevados.

As avarias mais comuns nos motores de indução têm origem nos rolamentos, nos enrolamentos do estator e nas barras do rotor. Conforme se verifica na Tabela 1, onde são comparados os resultados obtidos em 3 estudos, as avarias em rolamentos são aquelas que apresentam maior número de ocorrências, cerca de 40-45% do total [1].

**TABELA 1 – PERCENTAGEM DE AVARIAS, TENDO EM CONTA A SUA ORIGEM, EM MOTORES DE INDUÇÃO, COMPARAÇÃO ENTRE 3 ESTUDOS [2].**

COMPONENTES PRINCIPAIS	IEEE-IAS (%)	EPRI (%)	ALLIANZ (%)
Rolamentos	44	41	13
Estator	26	36	66
Rotor	8	9	13
Outras	22	14	8

A deteção de avarias mecânicas assume um papel crucial na conceção de um sistema de diagnóstico. Com vista a proceder à deteção da avaria no motor, são habitualmente analisados sinais de vibração provenientes da sua carcaça e sinais elétricos normalmente adquiridos na ligação do motor ao seu sistema de alimentação [1, 3]. À análise destes sinais estão comumente associadas técnicas de processamento de sinal, que permitem o tratamento e visionamento dos dados adquiridos



e o posterior diagnóstico da avaria. A obtenção dos sinais de vibração obriga a que seja necessário estabelecer contacto com a carcaça do motor, consistindo deste modo num método invasivo. Neste contexto, são preferidos os sistemas de diagnóstico baseados em sinais elétricos, visto que, para além de serem adquiridos numa forma não-invasiva, também possibilitam a deteção de avarias de origem elétrica.

Podendo funcionar de modo contínuo ou periódico, um sistema de diagnóstico de avarias num motor garante o aumento da fiabilidade no sistema onde o mesmo se encontra inserido [4, 5] reduzindo custos de manutenção e conduzindo a um planeamento mais eficiente e eficaz de todo o processo.

## **1.2. Motivação e objetivos de dissertação**

O motor de indução trifásico está presente de uma forma massiva no setor industrial. A constante preocupação deste setor com a rentabilidade do seu produto e com a fiabilidade do seu sistema produtivo obriga a que haja uma preocupação com os componentes que integram o referido sistema.

Habitualmente designado como o “coração” da indústria, o motor de indução é o elemento dos processos industriais cuja monitorização faz todo o sentido realizar. A análise de sinais de vibração da carcaça do motor e de sinais elétricos serve de base para a identificação da avaria mais comum neste tipo de motor, a avaria nos seus rolamentos. A introdução de técnicas avançadas de processamento de sinal na análise destes sinais tem como objetivo a capacidade de identificação da avaria, quando esta se encontra numa fase precoce.

Assim, os objetivos da presente dissertação são os seguintes:

- Análise de sinais de vibração da carcaça do motor segundo três direções;
- Análise dos sinais da corrente de alimentação e das potências ativa e reativa instantâneas do motor;
- Aplicação de técnicas de processamento de sinal de diferentes naturezas na deteção de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos.

## 2. TÉCNICAS AVANÇADAS DE PROCESSAMENTO DE SINAL APLICADAS NO DIAGNÓSTICO DE AVARIAS

---

A detecção de avarias em motores de indução pode ser conseguida por múltiplos métodos. São exemplos de métodos aplicados ao diagnóstico de avarias a aplicação de elementos finitos (a 2D ou 3D), a utilização de redes neuronais (ligadas, ou não, a lógica difusa), além da aplicação de técnicas avançadas de processamento de sinal nos domínios do tempo, frequência e tempo-frequência [1]. A aplicação de técnicas avançadas de processamento de sinal, nos domínios referidos, é o método mais aplicado no diagnóstico de avarias em motores de indução.

A aplicação das técnicas avançadas de processamento de sinal no domínio do tempo, onde se destaca o *cepstrum*, é mais eficaz na detecção de avarias em sistemas de energia elétrica. Já a aplicação de técnicas de processamento de sinal no domínio da frequência e do tempo-frequência no âmbito de diagnóstico de avarias em motores de indução, são as mais comuns. Nestes domínios são conhecidas técnicas cuja aplicação permite a obtenção de espectros de alta resolução (ex: MUSIC – Classificação de múltiplos sinais), assim como de espectros de ordem superior (*bispectrum*, *trispectrum*), requerendo elevados recursos computacionais [3]. No entanto, são as técnicas resultantes da aplicação de transformadas, muitas vezes associadas a outras transformadas e/ou algoritmos, que reúnem mais simpatizantes e que se encontram presentes na maior parte dos sistemas de diagnóstico existentes na atualidade.

### 2.1. Técnicas no domínio da frequência

#### 2.1.1. Transformada rápida de Fourier

Introduzida em 1965 por Cooley e Tukey [6], a transformada rápida de Fourier (FFT) consiste num algoritmo eficiente para a computação da transformada de Fourier discreta (DFT), assim como da sua inversa.

A expressão para o cálculo da DFT de um sinal discreto  $x[k]$  com  $N$  amostras é dada por:

$$X[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] e^{-j2\pi nk/N}, \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (2.1)$$

A aplicação da FFT permite a redução de  $N^2$  operações aritméticas para apenas  $N \log N$  operações, o que se traduz numa acentuada redução do tempo de cálculo especialmente para valores elevados de  $N$ .

A aplicação deste algoritmo promoveu uma evolução tecnológica nas várias áreas científicas que recorrem ao processamento de sinais no domínio da frequência. Na área das máquinas elétricas, a sua utilização tornou-se bastante comum, não sendo exceção a subárea do diagnóstico de avarias. Neste domínio, sinais de vibração da carcaça, corrente de alimentação, fluxo magnético, binário e velocidade de rotação são alvo de análise [3].

### 2.1.2. Transformada de Hilbert

A transformada de Hilbert (TH) é uma técnica de processamento de sinal, aplicada em diversos campos científicos, nomeadamente no diagnóstico de avarias [7], na transmissão de sinais [8], no processamento de dados geofísicos, na deteção de avarias mecânicas em cargas de motores elétricos [9] e no diagnóstico de avarias no rotor em gaiola de esquilo de motores de indução [10], entre outras aplicações.

Matematicamente, a TH é obtida através de

$$TH(x(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi t} * x(t), \quad (2.2)$$

podendo ser interpretada como uma convolução entre o sinal  $x(t)$  e  $1/(\pi t)$ . O sinal analítico ( $\bar{x}(t)$ ), que será utilizado na análise dos sinais de vibração e elétricos, é obtido através da seguinte expressão:

$$\bar{x}(t) = x(t) + jTH(x(t)) = a(t)e^{j\theta(t)}, \quad (2.3)$$

onde  $a(t) = \sqrt{x^2(t) + TH^2(x(t))}$ ,  $\theta(t) = \arctan[TH(x(t))/x(t)]$ , sendo  $a(t)$  a amplitude instantânea de  $\bar{x}(t)$  e  $\theta(t)$  a sua fase.

Esta transformação obedece a propriedades [11] que permitem uma melhor compreensão da sua aplicação. A TH surge como uma transformação no domínio do tempo, ou seja, é necessário calcular a FFT do sinal analítico para obter um espetro no domínio da frequência. A aplicação da TH a um sinal corresponde a uma versão desse mesmo sinal deslocado  $90^\circ$  [11, 12]. Assim, tendo como exemplo uma função trigonométrica, a TH transforma uma função cosseno numa função seno. Relativamente ao conteúdo espectral do sinal, a amplitude e a frequência obtidas são iguais às alcançadas com o sinal original, com a diferença de que apenas a fase das componentes espectrais associadas a cada frequência sofre um deslocamento de  $90^\circ$ . Observando (2.3), onde se define o sinal analítico, verifica-se a presença de uma parte do sinal que não sofre alterações relativamente ao sinal original, sendo apenas afetado pelo cálculo da FFT. Assim, uma parte do sinal analítico provém da

transformada de Fourier, anulando deste modo as frequências negativas do sinal original e dobrando a componente dc do mesmo [11].

### 2.1.3. Transformada Chirp-Z

Idealizada em 1969 por L. R. Rabiner, R. W. Schafer e C. M. Rader no *Massachusetts Institute of Technology*, a transformada Chirp-Z (CZT) consiste numa representação, no domínio da frequência, de um sinal complexo [13].

O princípio desta transformada deriva do algoritmo de Bluestein (a CZT é também conhecida como algoritmo de Bluestein FFT), permitindo uma decomposição espectral do sinal, no domínio da frequência. Analogamente, substituindo em (2.1)  $nk$  pela identidade [13]

$$nk = \frac{-(k-n)^2}{2} + \frac{n^2}{2} + \frac{k^2}{2} \quad (2.4)$$

e considerando os pontos  $Z_k$ , no plano complexo, utilizados na determinação da CZT, definidos por

$$Z_k = A \cdot W^{-k}, \quad k = 0, 1, \dots, M-1, \quad (2.5)$$

obtem-se

$$X_k = W^{\frac{k^2}{2}} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n A^{-n} W^{\frac{n^2}{2}} W^{-\frac{(k-n)^2}{2}}, \quad k = 0, \dots, M-1 \quad (2.6)$$

onde

- $A$  ponto inicial (número complexo);
- $W$  incremento (número complexo);
- $M$  número de pontos da CZT.

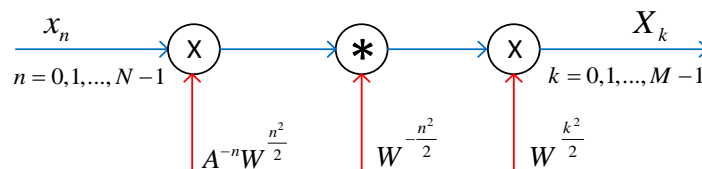


Fig. 2.1 - Diagrama representativo do cálculo da CZT [13].

A Fig. 2.1 apresenta sob a forma de um diagrama os passos seguidos para a determinação da CZT. É possível encontrar a sua implementação em áreas tão diversificadas como inspeções termográficas [14], no tratamento de imagens obtidas por ressonância magnética [15], em estimações que

necessitem de uma elevada resolução (por exemplo, nos sistemas de energia [16]) assim como no diagnóstico de avarias de máquinas elétricas.

Uma das características distintivas da CZT, por comparação com a FFT, é a possibilidade de alterar a resolução espectral de uma determinada região do espectro [13, 14, 17]. A obtenção de uma maior resolução espectral, aplicando a CZT, obriga a um maior esforço computacional, visto que necessita de  $N \cdot M$  operações [16], número superior às necessárias para calcular a FFT.

#### 2.1.4. Operador de energia Teager-Kaiser

O operador de energia Teager-Kaiser (TKEO) é um método amplamente utilizado na análise de sinais sonoros [18, 19], mais concretamente na modulação e transmissão de sinais [20], tendo surgido nos últimos anos aplicado ao diagnóstico de avarias [21, 22]. Desenvolvido no início da década de 90 por J. F. Kaiser, baseado em publicações realizadas por H. M. Teager, o algoritmo rege-se pela sua simplicidade [19], sendo caracterizado como um estimador energético de alta resolução [21].

O TKEO aplicado a sinais contínuos  $x(t)$  é definido através da expressão:

$$TKEO[x(t)] = [\dot{x}(t)]^2 - x(t)\ddot{x}(t), \quad (2.7)$$

onde  $\dot{x} = dx/dt$  e  $\ddot{x} = d^2x/dt^2$ .

Analogamente, aplicando o TKEO a sinais discretos  $x[n]$ ,

$$TKEO(x[n]) = x[n]^2 - x[n-1] \cdot x[n+1]. \quad (2.8)$$

A sua aplicação no domínio da frequência, assim como no caso da TH, exige o cálculo da FFT do sinal após a aplicação do algoritmo, conforme se encontra no diagrama presente na Fig. 2.2.

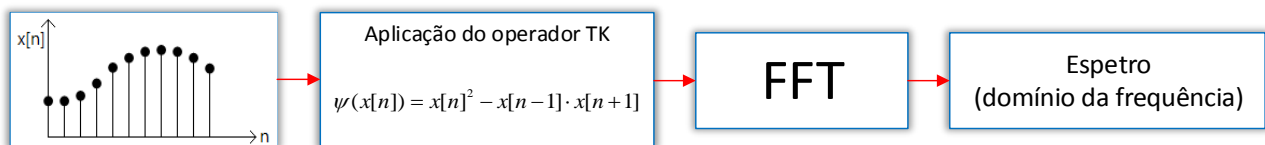


Fig. 2.2 - Implementação do TKEO no domínio da frequência.

## 2.2. Técnicas no domínio do tempo-frequência

### 2.2.1. Transformada de Fourier de curta duração

Matematicamente, a transformada de Fourier de curta duração (STFT) do sinal  $x(t)$  é definida através de:

$$STFT_x(t, \omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(\tau-t)e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.9)$$

onde:

$\omega$  frequência angular (rad/s);

$h(\tau)$  função da janela espectral.

Conforme o nome sugere, esta transformação baseia-se na transformada de Fourier. O princípio do seu funcionamento baseia-se na partição do sinal em blocos com a mesma janela temporal. A cada um desses blocos é aplicada a FFT [23, 24]. Este tipo de técnica permite observar, em simultâneo, a evolução do sinal no domínio do tempo e da frequência.

São várias as áreas onde este tipo de técnica é alvo de aplicações, principalmente em áreas cujos sinais processados variem no domínio temporal, tais como, sinais acústicos [25], sinais sísmicos [25, 26], sinais biomédicos [27], entre outros.

A aplicação da STFT necessita da definição de uma janela espectral, na qual se ponderam as resoluções temporal e da frequência do espectrograma. As escolhas do comprimento da janela espectral ( $W_l$ ), da sua função, assim como o número de blocos temporais ( $B$ ), anteriormente mencionado, devem estar relacionadas com as características do sinal analisado. No que respeita à função da janela espectral utilizada, habitualmente a escolha recai sobre a janela de *Hanning*. A janela espectral de *Hanning*,  $w(k)$ , privilegia uma maior resolução da frequência em detrimento da precisão da amplitude do sinal, sendo caracterizada pela seguinte expressão:

$$w(k) = 0.5 \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi k}{W_l} \right) \right), \quad 0 \leq k \leq W_l. \quad (2.10)$$

O número de janelas espectrais ( $W_n$ ) utilizadas no espectrograma permite definir se estas se encontram sobrepostas ou deslocadas [28], sendo designado por *overlap* o fator que caracteriza este comportamento, definido através da seguinte expressão (expresso em percentagem):

$$overlap(\%) = \frac{W_n - B}{W_n} \times 100\%. \quad (2.11)$$

A título de exemplo, quando o *overlap* é de 50 %, perante blocos com 100 amostras, a 1ª janela espectral incide sobre as primeiras 100 amostras, a 2ª incide sobre amostras de dois blocos (entre a 50ª e a 150ª amostra), a 3ª incide só sobre as amostras do 2º bloco, e assim sucessivamente.

## 2.2.2. Distribuição de Wigner-Ville

A distribuição de Wigner-Ville (WVD), desenvolvida inicialmente para a área da mecânica quântica, foi concebida *a priori* pelo físico húngaro-americano Eugene P. Wigner, em 1932. Apenas 15 anos depois, associando o seu princípio à área do processamento de sinal, o cientista francês J. Ville idealizou o algoritmo da forma como ainda hoje é utilizado. Ao contrário da STFT, que se baseia na decomposição do próprio sinal, a WVD foca-se na decomposição da densidade energética do sinal [28, 29], também no domínio da frequência e do tempo, obedecendo à seguinte relação:

$$WVD_{x,x}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2j\pi f\tau} d\tau \quad (2.12)$$

onde:

$t$  tempo (s);

$f$  frequência (Hz).

Analisando (2.12), o principal fundamento desta técnica passa pela correlação do próprio sinal com a sua translação no domínio temporal e da frequência (esta distribuição é bilinear, no que respeita ao sinal processado), anulando a perda de resolução resultante do *overlap* característico da STFT [28-31]. Desta forma, torna-se dispensável a definição de uma janela espectral conseguindo-se uma melhor resolução nos domínios temporal e de frequência. Algo que também diferencia a STFT e a WVD é a sua linearidade. A WVD não é linear, visto que  $WVD_{(x+y),(x+y)}(t, f) \neq WVD_{x,x}(t, f) + WVD_{y,y}(t, f)$ , levando ao aparecimento de termos cruzados. Os termos cruzados, que advêm da correlação dos sinais, consistem em amplitudes anormais elevadas que surgem em zonas do espectrograma localizadas entre áreas onde o sinal é caracterizado por uma elevada amplitude [28, 31]. A existência destes termos pode originar uma maior dificuldade na interpretação dos resultados obtidos, devido à sobreposição dos mesmos com o sinal processado.

Têm surgido várias técnicas nas últimas décadas com vista à redução do impacto destes termos cruzados, em detrimento de uma melhor resolução espectral. Estas extensões à WVD pertencem à classe *Cohen*, nas quais se incluem as distribuições *Pseudo Wigner-Ville*, *Choi-Williams (CWD)*, *Zhao-Atlas-Marks*, *Born-Jordan*, entre outras. A estas distribuições estão associados custos computacionais mais elevados e conseqüentemente um processamento mais lento do sinal.

### 2.3. Transformada de Onduleta

Nos finais da década de 70 Jean Morlet, um engenheiro geofísico francês, desenvolveu uma alternativa à STFT. Os sinais que Morlet pretendia analisar deveriam ser decompostos em diferentes períodos ou gamas de frequência, pretendendo que as componentes de alta frequência estivessem associadas a períodos mais reduzidos, comparativamente com as componentes de baixa frequência. Com vista a obter uma boa resolução temporal a alta frequência e uma boa resolução de frequência a baixa frequência numa só transformada, Morlet usou a janela de Gauss, comprimindo-a, para obter a função representativa das altas frequências, ou distendendo-a, para obter a função representativa das baixas frequências, no domínio do tempo [32]. Conjugando todas estas premissas, Morlet e Grossmann desenvolveram a transformada de onduleta contínua (CWT). Já a transformada de onduleta discreta (DWT) foi “descoberta” pelo húngaro Alfréd Haar no início do século XX, visto que a transformada que este desenvolveu enquadra-se na família das onduletas,  $\psi^{a,b}$ , derivada da onduleta-mãe,  $\psi$ , definida por [33]:

$$\psi^{a,b}(s) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{s-b}{a}\right), \quad (2.13)$$

para sinais contínuos e

$$\psi_{m,n}(x) = a_0^{-m/2} \psi\left(\frac{x - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m} x - nb_0), \quad (2.14)$$

para sinais discretos considerando  $a = a_0^m$ ,  $b = nb_0 a_0^m$ , sendo que:

- $a$  parâmetro da escala;
- $b$  parâmetro do tempo;
- $m, n$  números inteiros iguais a 0,1,2,...

Ingrid Daubechies desenvolveu, na década de 80, uma família de onduletas ortogonais [33]. Em 1986, Stéphane Mallat e Yves Meyer desenvolveram o método de análise em multiresolução (MRA) aplicado à DWT, proporcionando a criação da transformada de onduleta rápida. Já em 1992, Meyer, juntamente com Ronald Coifman e Victor Wickerhauser, criou a transformada de onduleta por pacotes (WPT), uma extensão à MRA [32, 34].

Apesar do domínio da onduleta se confundir com o associado à STFT e à WVD, a função da onduleta tem como característica o facto de ser “escalável”, isto é, permite que a sua transformada adapte a resolução a várias gamas de frequência e/ou espaços temporais [33, 35]. Para tal, os



parâmetros presentes em (2.14) devem ser definidos consoante a utilidade e o desempenho desejado. Por conseguinte, o domínio da transformada de onduleta é normalmente designado por tempo-escala.

### 2.3.1. Transformada de Onduleta contínua

A CWT foi originalmente criada para tratamento de sinais sísmicos. Para além da aplicação referida, esta técnica tem sido utilizada com sucesso no tratamento de imagens (essencialmente ao nível da compressão), no processamento de sinais acústicos, na análise de sinais biomédicos, entre outras [27, 36]. Desde meados da década de 90 que surge como um método regular e eficazmente aplicado no diagnóstico de avarias em máquinas elétricas, essencialmente na análise de sinais de vibração. O facto de garantir uma resolução variável para diversas gamas de frequência, comportar um baixo custo computacional quando comparada com métodos de aplicação similar e não se registar interferência de termos cruzados, faz com que a utilização deste método seja perfeitamente adequada à área em estudo [34].

Traduzindo matematicamente a CWT, considerando (2.13), esta pode ser determinada aplicando a seguinte expressão [33, 34]:

$$CWT_x(a, b; \psi) = a^{-1/2} \int x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (2.15)$$

em que  $\psi^*(\bullet)$  representa o complexo conjugado de  $\psi(\bullet)$ .

O estudo do módulo da CWT do sinal é bastante comum em várias aplicações da engenharia, visto que representa a energia do sinal. Por norma, o quadrado do módulo do sinal é representado num escalograma ( $SG_x$ ), sendo esta uma das visualizações/ferramentas mais utilizadas no diagnóstico de avarias, definindo-se desta forma [34]:

$$SG_x(a, b; \psi) = |CWT_x(a, b; \psi)|^2 \quad (2.16)$$

De modo a sintetizar as técnicas abordadas, apresentam-se na Tabela 2 comparações relativas a alguns métodos de análise no domínio do tempo-frequência.

TABELA 2 - COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO-FREQUÊNCIA [34].

MÉTODO	RESOLUÇÃO	INTERFERÊNCIA DE TERMOS CRUZADOS	VELOCIDADE DE PROCESSAMENTO
CWT	Alta resolução de frequência e baixa resolução do tempo a baixas frequências. Baixa resolução de frequência e alta resolução do tempo a altas frequências.	Não.	Rápida.
STFT	Dependente da função da janela espectral. Alta resolução no domínio do tempo ou da frequência.	Não.	Rápida, mais lenta do que a CWT.
WVD	Alta resolução no domínio do tempo e da frequência.	Sim, bastante.	Rápida, mas mais lenta do que a STFT.
CWD	Alta resolução no domínio do tempo e da frequência, mas inferior à WVD.	Sim, pouco.	Muito lenta.

### 2.3.2. Transformada de Onduleta discreta

A DWT está presente em diversas aplicações do cotidiano, tendo grande notoriedade a sua aplicação na codificação de sinais, em algoritmos de compressão de dados (ex: JPEG), nas ciências biomédicas (no projeto de *pacemakers*), entre outras. Com vista à determinação da DWT, considerando (2.14), é aplicada a seguinte expressão:

$$DWT(m, n) = a_0^{-m/2} \sum_k x(k) \psi \left( \frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right). \quad (2.17)$$

Conforme mencionado anteriormente, a aplicação da DWT tem sido sujeita a melhoramentos com a introdução de novas famílias de onduletas, da MRA e da WPT. A MRA consiste na aplicação da DWT a gamas de frequência específicas, recorrendo a filtros passa-baixo e passa-alto e a subamostragens nas transições entre os níveis. Este algoritmo é bidirecional, possibilitando tanto a decomposição como a reconstrução do sinal em vários níveis [37, 38].

Focando apenas na decomposição do sinal, que é o procedimento mais utilizado no diagnóstico de avarias, o sinal discreto  $x[n]$  pode ser decomposto como [39, 40]:

$$x[n] = \sum_{k=1}^{\frac{N}{2^j}} a_{j_0,k} \phi_{j_0,k}[n] + \sum_{j=j_0}^{J-1} \sum_{k=1}^{\frac{N}{2^j}} d_{j,k} \psi_{j,k}[n], \quad (2.18)$$

onde:

- $\phi[n]$  função escala;
- $\psi[n]$  onduleta-mãe;
- $a_{j_0,k}$  coeficientes de aproximação da onduleta;
- $d_{j,k}$  coeficientes de detalhe da onduleta;

- $N$  número de amostras do sinal;  
 $J$  número total de escalas (definido pelo utilizador).

Portanto, a função escala permite a obtenção dos coeficientes de aproximação, associados à baixas frequências. Já a onduleta-mãe obtém os coeficientes de detalhe, representativos das altas frequências [39]. Estas funções obedecem às seguintes equações

$$\int \phi(t) dt = 1, \quad (2.19)$$

$$\int \psi(t) dt = 0. \quad (2.20)$$

As funções  $\phi_{j_0,k}[n]$  e  $\psi_{j,k}[n]$ , presentes em (2.18), definem-se de acordo com as seguintes expressões

$$\phi_{j_0,k}[n] = 2^{j_0/2} \phi(2^{j_0} n - k), \quad (2.21)$$

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{j/2} \psi(2^j n - k), \quad j = 1, \dots, J, \quad k = 1, 2, \dots, N / 2^j. \quad (2.22)$$

A escala (ou nível de multiresolução)  $j_0$  representa a banda das frequências mais baixas do sinal original decomposto. Os coeficientes de detalhe, representados nas Fig. 2.3 e Fig. 2.4 como “cD<sub>x</sub>”, são obtidos às escalas de índice  $j$ , a partir do sinal original, aplicando filtros passa-alto (sendo a sua função de transferência designada de filtro de escala,  $h[n]$ ), enquanto que os coeficientes de aproximação, nas figuras designado como “cA<sub>x</sub>”, são determinados recorrendo a filtros passa-baixo (filtro da onduleta,  $g[n]$ ). A Fig. 2.3 ilustra um diagrama de blocos correspondente à decomposição do sinal  $x[n]$  em 4 níveis. Para determinar os coeficientes, numa decomposição/transição para nível superior,  $h[n]$  e  $g[n]$  devem obedecer às seguintes expressões [40, 41]:

$$a_{j_0,m} = \sum_k h[k - 2m] a_{j_0-1,k}, \quad (2.23)$$

$$d_{j,m} = \sum_k g[k - 2m] a_{j-1,k}. \quad (2.24)$$

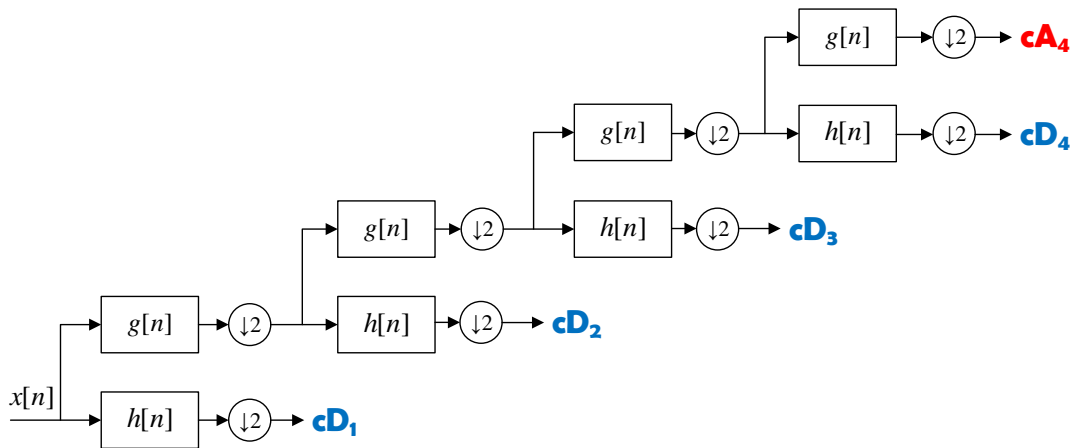


Fig. 2.3 - Decomposição do sinal, segundo a MRA, em 4 níveis.

Na Fig. 2.4 são apresentadas as gamas de frequência alvo com vista à determinação dos coeficientes, tendo como referência a frequência de amostragem  $f_s$ . Com o intuito de minimizar os possíveis efeitos de sobreposição de bandas de frequência, deve ser utilizada uma onduleta-mãe de maior ordem, originando a necessidade de filtros de maior ordem. A escolha da onduleta-mãe obriga à ponderação do seu desempenho computacional [39].

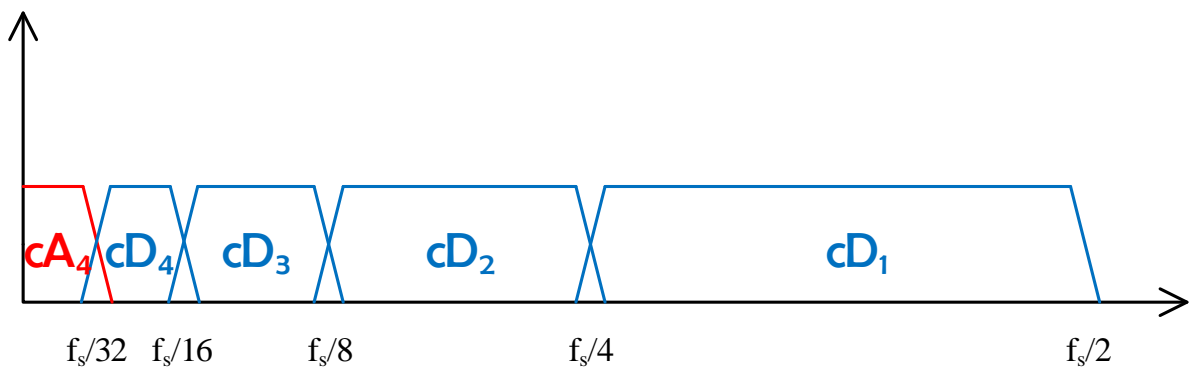


Fig. 2.4 - Gama de frequências coberta pelos coeficientes, decomposição em 4 níveis.

Outra forma de processar o sinal utilizando a DWT é a WPT. O princípio de funcionamento é semelhante à MRA, havendo no entanto decomposição das bandas de frequência associadas aos coeficientes de detalhe [37, 40, 42]. Essa decomposição realiza-se sob o mesmo mecanismo da MRA, ocorrendo a subamostragem do sinal quando se muda de nível. A configuração da decomposição do sinal assemelha-se a uma árvore, correspondendo a cada nó da mesma um grupo de coeficientes. Todos os nós de um nível (representativos dos coeficientes,  $c_{x,y}$ ) apresentam a mesma largura da banda de frequência, visível na Fig. 2.5.

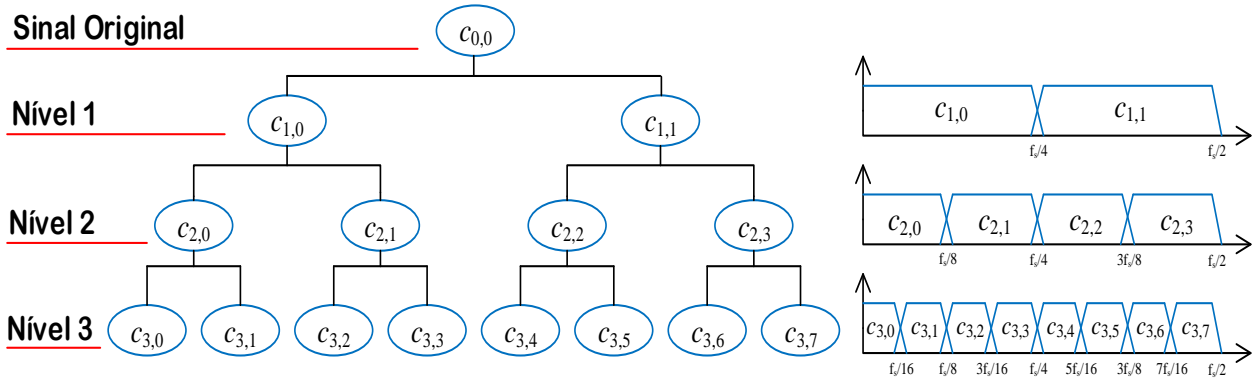


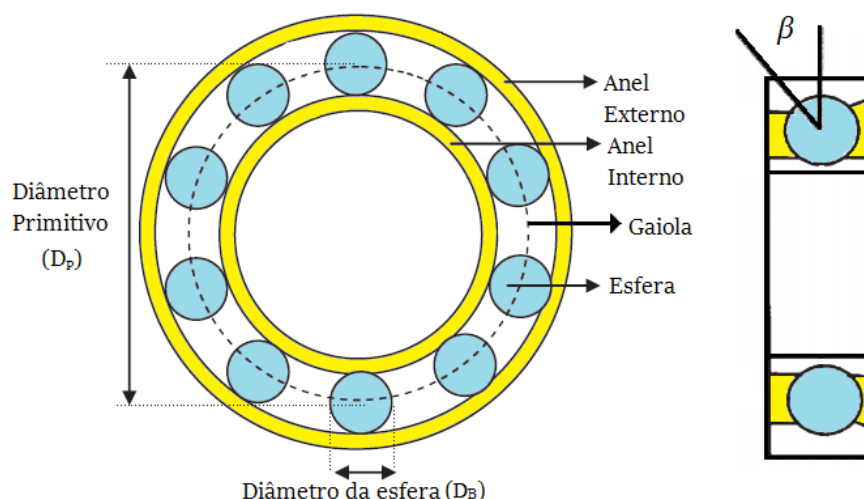
Fig. 2.5 - Diagrama da decomposição do sinal em 3 níveis e respectivas gamas de frequência, utilizando o WPT.

## 3. AVARIAS EM ROLAMENTOS

### 3.1. Tipos de avarias

De forma a garantir um diagnóstico eficaz, é necessário compreender a mecânica do rolamento, quer do ponto de vista do seu funcionamento, quer da sua natureza. As avarias em rolamentos podem surgir de formas distintas, de acordo com o descrito anteriormente, caracterizando-se a sua manifestação segundo duas formas. Estas formas estão relacionadas com o tipo de avaria do rolamento, sendo designadas como defeitos singulares ou generalizados [43, 44].

As falhas singulares caracterizam-se como sendo localizadas e as frequências que permitem a deteção da avaria podem ser determinadas. Estas frequências dependem das dimensões do rolamento, assim como da velocidade associada ao veio da máquina [1, 3, 43-46].



**Fig. 3.1 - Dimensões e elementos constituintes de um rolamento de esferas [45].**

As frequências características variam consoante a localização da avaria. Na Fig. 3.1 encontram-se ilustrados os elementos do rolamento, os anéis externo e interno, as esferas, estando a cada um destes associada uma frequência característica, definidas através das seguintes expressões:

$$f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 - \frac{D_B}{D_P} \cos \beta \right), \quad (3.1)$$

$$f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 + \frac{D_B}{D_P} \cos \beta \right), \quad (3.2)$$

$$f_b = \frac{D_P}{D_B} f_r \left( 1 - \frac{D_B^2}{D_P^2} \cos^2 \beta \right), \quad (3.3)$$

onde:

$f_o$  frequência característica do anel externo (Hz);

$f_i$  frequência característica do anel interno (Hz);

$f_b$  frequência característica das esferas (Hz);

$f_r$  frequência mecânica de rotação do rotor (Hz);

$D_p$  diâmetro primitivo (mm);

$D_B$  diâmetro da esfera (mm);

$N_b$  número de esferas;

$\beta$  ângulo de contacto (em graus, habitualmente considerado nulo).

Este tipo de anomalia advém da existência de uma racha, cova ou simplesmente uma deformação na estrutura. As frequências derivam da vibração proveniente da degradação de uma determinada parte do rolamento. Antevendo a dificuldade de identificação das dimensões características do rolamento alvo, as seguintes aproximações são viáveis para rolamentos que tenham entre 6 e 12 esferas [3, 44-46]:

$$f_o = 0.4N_b f_r \quad (3.4)$$

$$f_i = 0.6N_b f_r . \quad (3.5)$$

Os defeitos generalizados surgem num rolamento como resultado da falta de lubrificante do mesmo, contaminação ou corrosão associada a partículas provenientes do exterior da máquina ou até mesmo devido a uma má instalação do rolamento [43]. Este tipo de anomalias não surge associado a frequências que as permitam identificar, sendo mais comum a sua manifestação havendo uma maior intensidade do sinal em gamas de frequência imprevisíveis. A Fig. 3.2 sumariza, de uma forma geral, os passos característicos de uma avaria num rolamento.

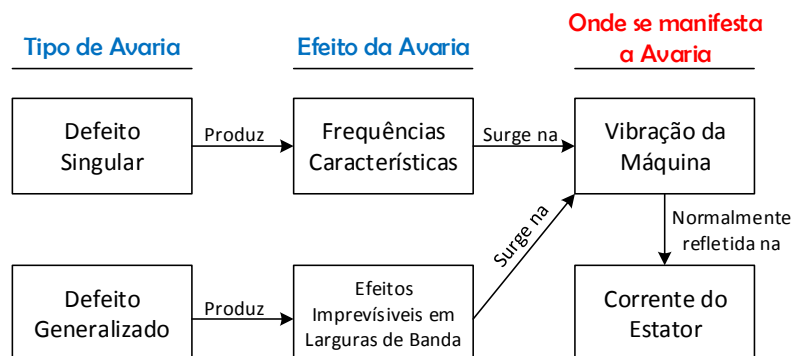


Fig. 3.2 - Diagrama com os tipos, efeitos e manifestações das avarias em rolamentos [43].

## 3.2. Detecção das avarias

### 3.2.1. Análise dos sinais de vibração da carcaça do motor

De acordo com o que foi anteriormente referido, uma das consequências das avarias de natureza mecânica é o aumento do nível de vibração do motor. No diagnóstico de avarias em rolamentos, a utilização de acelerómetros é bastante comum para obtenção de sinais de vibração da carcaça do motor. Tendo em consideração (3.4), as frequências características da avaria no anel externo dos rolamentos, associadas a sinais de vibração recolhidos na carcaça, são obtidas segundo a seguinte expressão:

$$f_{BPO} = k \cdot f_o, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (3.6)$$

Em virtude do anel interno do rolamento estar constantemente em movimento, solidário com o veio, concluiu Blödt [46] que existem componentes características da avaria relacionadas com a frequência de rotação do veio, refutando o modelo de Schoen [47] cujas frequências características da avaria no anel interno seriam determinadas de modo semelhante às do anel externo. Deste modo, as frequências características da avaria presentes em sinais de vibração são obtidas através da seguinte expressão [3]:

$$f_{BPI} = \pm f_i + m \cdot f_r, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.7)$$

### 3.2.2. Análise dos sinais elétricos

Em ambiente industrial, a acessibilidade dos motores elétricos é, por vezes, muito difícil, havendo a dificuldade de aceder à sua carcaça com vista à realização do diagnóstico. Neste sentido, um bom sistema de diagnóstico com base em sinais elétricos permite resolver esta situação, ao invés de um sistema que requeira sinais de vibração.

Assim como nos sinais de vibração, para proceder à análise de sinais elétricos associados ao motor é necessário determinar as frequências características, tendo como referência as determinadas em (3.6) e em (3.7), seguindo o modelo de Blödt. A estas frequências encontra-se associada a frequência característica da alimentação do motor,  $f_e$ . No mundo científico, este tipo de análise é designado como assinatura da corrente do motor (MCSA), em consequência da visão espectral obtida da corrente elétrica. Por conseguinte, as expressões que traduzem as frequências características das avarias no anel externo e interno são [44, 46]:

$$f_{iBPO} = |f_e \pm k \cdot f_o|, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (3.8)$$



$$f_{iBPI} = |f_e \pm f_r \pm k \cdot f_i|, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3.9)$$

Se conhecermos as correntes e tensões de alimentação do motor elétrico, conseguiremos determinar as potências ativa e reativa consumidas pelo mesmo. O recurso a técnicas de diagnóstico com base nas potências ativa e reativa instantâneas do motor tem sido explorado essencialmente em avarias como curto-circuitos entre espiras [48] e barras do rotor fraturadas [49-51]. Estas grandezas são determinadas tendo como base a teoria generalizada das máquinas elétricas, onde as potências ativa e reativa instantâneas, recorrendo à transformação de Park, são definidas de acordo com as seguintes expressões, respetivamente:

$$p = \frac{3}{2} (v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q), \quad (3.10)$$

$$q = \frac{3}{2} (v_q \cdot i_d - v_d \cdot i_q). \quad (3.11)$$

Considerando um motor alimentado por um sistema direto de tensões, as tensões, presentes em (3.10) e (3.11), são dadas por:

$$v_d = v_m \cdot \cos(\omega_e t), \quad (3.12)$$

$$v_q = v_m \cdot \sin(\omega_e t). \quad (3.13)$$

onde:

$v_m$  valor máximo da tensão elétrica do sistema de alimentação do motor (V);

$\omega_e$  frequência angular elétrica do sistema de alimentação (rad/s).

Já as expressões representativas das correntes, considerando as componentes espectrais existentes em caso de avaria [52] determinadas em (3.8) para o anel externo, estando associadas a cada valor de  $k$  duas correntes, são as seguintes:

$$i_d = i_f \cdot \cos(\omega_e t - \alpha) + i_{dl} \cdot \cos(\omega_e t - \omega_n t - \beta_l) + i_{dr} \cdot \cos(\omega_e t + \omega_n t - \beta_r), \quad (3.14)$$

$$i_q = i_f \cdot \sin(\omega_e t - \alpha) + i_{dl} \cdot \sin(\omega_e t - \omega_n t - \beta_l) + i_{dr} \cdot \sin(\omega_e t + \omega_n t - \beta_r). \quad (3.15)$$

Em conformidade com (3.9), para o caso do anel interno, as expressões das correntes que representam as componentes espectrais características são dadas por:

$$i_d = i_f \cdot \cos(\omega_e t - \alpha) + i_{dl} \left( \cos(\omega_e t - \omega_n t - \omega_r t - \beta_l) + \cos(\omega_e t - \omega_n t + \omega_r t - \beta_l) \right) + i_{dr} \left( \cos(\omega_e t + \omega_n t - \omega_r t - \beta_r) + \cos(\omega_e t + \omega_n t + \omega_r t - \beta_r) \right), \quad (3.16)$$

$$i_q = i_f \cdot \sin(\omega_e t - \alpha) + i_{dl} \left( \sin(\omega_e t - \omega_n t - \omega_r t - \beta_l) + \sin(\omega_e t - \omega_n t + \omega_r t - \beta_l) \right) + i_{dr} \left( \sin(\omega_e t + \omega_n t - \omega_r t - \beta_r) + \sin(\omega_e t + \omega_n t + \omega_r t - \beta_r) \right), \quad (3.17)$$

onde:

- $i_f$  amplitude do termo fundamental da corrente elétrica de alimentação do motor (A);
- $i_{dl}$  amplitude da componente espectral da corrente elétrica absorvida pelo motor associada às frequências determinadas em (3.8),  $|f_e - k \cdot f_o|$ , ou em (3.9),  $|f_e - k \cdot f_i \pm f_r|$  (A);
- $i_{dr}$  amplitude da componente espectral da corrente elétrica absorvida pelo motor associada às frequências determinadas em (3.8),  $|f_e + k \cdot f_o|$ , ou em (3.9),  $|f_e + k \cdot f_i \pm f_r|$  (A);
- $\alpha$  fase inicial do termo fundamental da corrente elétrica de alimentação do motor (rad);
- $\beta_l$  fase inicial da componente espectral da corrente elétrica absorvida pelo motor associada às frequências determinadas em (3.8),  $|f_e - k \cdot f_o|$ , ou em (3.9),  $|f_e - k \cdot f_i \pm f_r|$  (rad);
- $\beta_r$  fase inicial da componente espectral da corrente elétrica absorvida pelo motor associada às frequências determinadas em (3.8),  $|f_e + k \cdot f_o|$ , ou em (3.9),  $|f_e + k \cdot f_i \pm f_r|$  (rad);
- $\omega_n$  frequência angular natural (rad/s);
- $\omega_r$  frequência angular elétrica de rotação do rotor (rad/s).

A frequência angular natural,  $\omega_n$ , relaciona-se com o anel do rolamento em questão, conforme utilizado nas equações (3.8) ou (3.9), estando diretamente ligada às frequências características dos mesmos, determinadas em (3.1) e (3.2).

Pelo exposto, considerando as deduções realizadas, as expressões que determinam as potências ativa e reativa instantâneas são, para o anel externo, respetivamente:

$$p = \frac{3}{2} \left[ v_m i_f \cos(\alpha) + v_m i_{dl} \cos(\omega_n t + \beta_l) + v_m i_{dr} \cos(\omega_n t - \beta_r) \right], \quad (3.18)$$

$$q = \frac{3}{2} \left[ v_m i_f \sin(\alpha) + v_m i_{dl} \sin(\omega_n t + \beta_l) + v_m i_{dr} \sin(\omega_n t - \beta_r) \right]. \quad (3.19)$$

Seguindo o raciocínio, relativamente ao anel interno, as seguintes expressões permitem determinar as potências ativa e reativa instantâneas:

$$p = \frac{3}{2} \left( v_m i_f \cos(\alpha) + v_m i_{dl} \left[ \cos(\omega_n t + \omega_r t + \beta_l) + \cos(\omega_n t - \omega_r t + \beta_l) \right] + v_m i_{dr} \left[ \cos(\omega_n t - \omega_r t - \beta_r) + \cos(\omega_n t + \omega_r t - \beta_r) \right] \right), \quad (3.20)$$

$$q = \frac{3}{2} \left( v_m i_f \sin(\alpha) + v_m i_{dl} [\sin(\omega_n t + \omega_r t + \beta_l) + \sin(\omega_n t - \omega_r t + \beta_l)] + v_m i_{dr} [\sin(\omega_n t - \omega_r t - \beta_r) + \sin(\omega_n t + \omega_r t - \beta_r)] \right) \quad (3.21)$$

Em suma, analisando (3.18), (3.19), (3.20) e (3.21), as frequências características da avaria em rolamentos no motor de indução associadas às potências ativa e reativa instantâneas são obtidas segundo as seguintes equações, no anel externo e interno:

$$f_{pqBPO} = k \cdot f_o, \quad (3.22)$$

$$f_{pqBPI} = \pm f_i \pm k \cdot f_r, \quad (3.23)$$

onde:

$f_{pqBPO}$  frequências características da avaria das potências ativa e reativa instantâneas no anel externo (Hz);

$f_{pqBPI}$  frequências características da avaria das potências ativa e reativa instantâneas no anel interno (Hz);

$f_o$  frequência característica do anel externo (Hz);

$f_i$  frequência característica do anel interno (Hz);

$f_r$  frequência mecânica de rotação do rotor (Hz);

$k$  número inteiro igual a 1,2,3,...

As aplicações do TKEO (operador de energia Teager-Kaiser) e da TH (transformada de Hilbert) no domínio da frequência realçam outras componentes espectrais características da avaria na corrente de alimentação do motor. Tendo como ponto de partida a equação da corrente elétrica de alimentação do motor  $i_s$ , quando na presença de uma avaria,

$$i_s = i_f \cos(\omega_e t + \alpha) + i_{dl} \cos(\omega_e t - \omega_n t - \beta_l) + i_{dr} \cos(\omega_e t + \omega_n t - \beta_r) \quad (3.24)$$

aplicando o TKEO (desprezando  $i_{dr} \cdot i_{dl}$ ,  $i_{dl}^2$  e  $i_{dr}^2$  visto que  $i_{dl}, i_{dr} \ll i_f$ ) obtemos:

$$\begin{aligned}
i_{s,TKEO} = & i_f^2 \omega_e^2 \sin^2(\omega_e t) + \frac{i_f^2 \omega_e^2}{2} [\cos(2\omega_e t - \alpha) + \cos(\alpha)] + \\
& + \frac{1}{2} i_f i_{dl} (\omega_e - \omega_n)^2 [\cos(2\omega_e t - \omega_n t - \alpha) + \cos(\omega_n t - \alpha)] + \\
& + \frac{1}{2} i_f i_{dr} (\omega_e + \omega_n)^2 [\cos(2\omega_e t + \omega_n t - \alpha) + \cos(\omega_n t - \alpha)] + \quad . \quad (3.25) \\
& + \frac{1}{2} i_f i_{dl} \omega_e^2 [\cos(2\omega_e t - \omega_n t - \beta_l) + \cos(\omega_n t - \beta_l)] + \\
& + \frac{1}{2} i_f i_{dr} \omega_e^2 [\cos(2\omega_e t + \omega_n t - \beta_r) + \cos(\omega_n t - \beta_r)]
\end{aligned}$$

Portanto, com base em (3.25), as frequências características da avaria nos rolamentos, quer no anel externo quer no anel interno, identificáveis no espectro da corrente elétrica com a aplicação do TKEO são iguais às identificadas em sinais de vibração ou de potência elétrica, além das frequências que surgem em redor do dobro da frequência de alimentação do motor [22].

A aplicação da TH resulta no sinal analítico da corrente de alimentação do motor  $\bar{i}_s$ . Assim sendo, visto que

$$TH(i_s) = i_f \sin(\omega_e t + \alpha) + i_{dl} \sin(\omega_e t - \omega_n t - \beta_l) + i_{dr} \sin(\omega_e t + \omega_n t - \beta_r), \quad (3.26)$$

o módulo do sinal analítico da aplicação da TH é dado pela expressão (considerando  $i_{dl} \approx i_{dr}$ ):

$$|\bar{i}_s| = |i_f + i_{dl} + i_{dr}| + \sqrt{2} |i_{dl} + i_{dr}| \cos(\omega_n t). \quad (3.27)$$

Deste modo verifica-se que as frequências características das avarias nos rolamentos nos sinais da corrente de alimentação do motor, através da aplicação da TH, são idênticas às visualizadas nos espectros dos sinais de potência elétrica e de vibração [11].

A Tabela 3 sistematiza a determinação das frequências características para cada grandeza estudada, abordadas neste capítulo.

**TABELA 3 – FREQUÊNCIAS CARACTERÍSTICAS DE AVARIAS NOS ANÉIS DOS ROLAMENTOS PARA OS DIFERENTES SINAIS.**

ANEL	VIBRAÇÃO	CORRENTE <sup>1</sup>	POTÊNCIA ATIVA/REATIVA
Externo	$k \cdot f_o$	$ f_e \pm k \cdot f_o $	$k \cdot f_o$
Interno	$\pm f_i \pm k \cdot f_r$	$ f_e \pm f_r \pm k \cdot f_i $	$\pm f_i \pm k \cdot f_r$

<sup>1</sup> Não aplicável em espectros onde são utilizados o TKEO ou a TH



## 4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 4.1. Descrição da montagem e do procedimento experimental

De forma a proceder a uma análise interpretativa das várias técnicas de processamento de sinal aplicadas ao diagnóstico de avarias em rolamentos, foi dimensionado um sistema com vista à aquisição de sinais elétricos e de vibração associados ao motor de indução em estudo, cujas características nominais se encontram mencionadas no ANEXO I. O esquema da montagem experimental dimensionada encontra-se ilustrado na Fig. 4.1.

O motor de indução trifásico alvo, de 3 kW, tem os seus enrolamentos estatóricos ligados em triângulo e é alimentado pela rede trifásica, com uma tensão composta de 400 V, 50 Hz, controlada por um autotransformador. O motor foi acoplado mecanicamente a um gerador de corrente contínua de 4 kW (características nominais presentes no ANEXO I), que por sua vez foi ligado a uma carga resistiva. O gerador em causa funciona com o circuito de excitação separado. Regulando a corrente de excitação do gerador, torna-se possível analisar o comportamento do motor a vários níveis de carga, caracterizados pela velocidade de rotação do grupo motor/gerador.

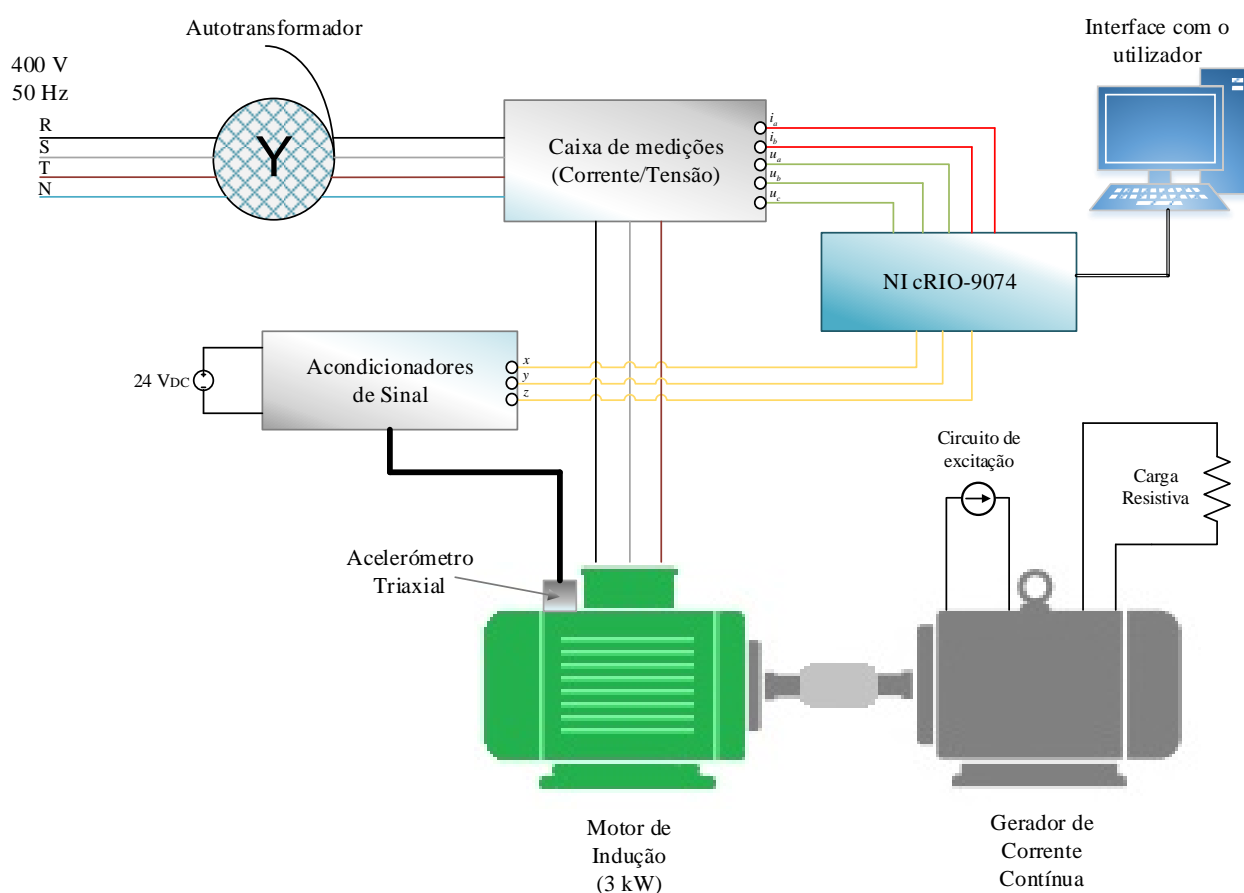


Fig. 4.1 – Diagrama representativo da montagem experimental.



**Fig. 4.2 – Rolamentos com avaria: (a) furo de 2 mm no anel externo; (b) furo de 4 mm no anel interno.**

Tendo em vista a identificação das avarias em rolamentos e a evolução da respetiva severidade, foram danificados diversos rolamentos [53], distinguindo-se cada um segundo a localização da avaria e o seu grau de severidade.

Foram utilizados para procedimento experimental rolamentos com furos únicos de 2 e 4 mm de diâmetro, aplicados nos anéis externo e interno dos mesmos. Alguns exemplos dos rolamentos utilizados encontram-se ilustrados na Fig. 4.2. Seguindo as indicações provenientes do fabricante do MIT (motor de indução trifásico), foram utilizados rolamentos 6206, do lado do ataque (*drive end*), e 6205, do lado do ventilador (*non-drive end*), encontrando-se as respetivas dimensões especificadas na Tabela 4.

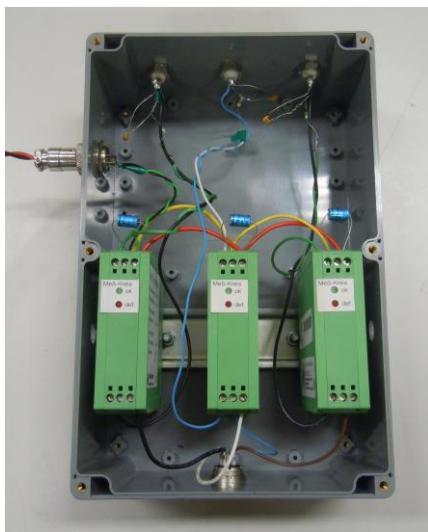
**TABELA 4 – DIMENSÕES DOS ROLAMENTOS.**

DIMENSÕES	6205	6206
Diâmetro externo (mm)	52	62
Diâmetro do furo (mm)	25	30
Largura (mm)	15	16
Número de esferas	9	9
Diâmetro da esfera (mm)	7.925	9.525
Diâmetro primitivo (mm)	38.989	46.482

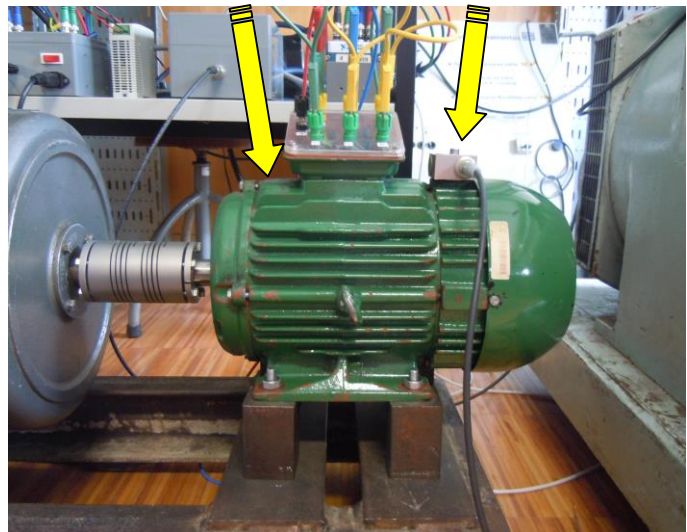
Os sinais de vibração da carcaça foram obtidos com recurso a um acelerómetro triaxial da *Vibrasens*, cuja sensibilidade é de 1000 mV/g, que apresenta resposta para a gama de frequências até 3700 Hz, podendo este ser fixado à carcaça em dois pontos distintos, sob as zonas onde se encontram posicionados os rolamentos. A Fig. 4.3(b) mostra as posições onde o acelerómetro foi fixado. O facto de o acelerómetro ser triaxial permite captar sinais em três direções, tendo como referência a sua posição na carcaça - direção tangencial (eixo *x*), direção axial (eixo *y*), e direção radial (eixo *z*). A fixação do acelerómetro foi conseguida utilizando para o efeito um parafuso, garantindo assim um

contacto firme e estável com a carcaça do motor, possibilitando a aquisição de sinal a altas frequências com menor risco de perturbações associadas a um contacto deficiente.

Os condicionadores de sinal (principais características e circuito equivalente presentes no ANEXO II), alimentados por uma fonte de alimentação de 24 V, realizam uma filtragem do sinal, providenciando uma tensão alternada proporcional ao sinal medido. Basicamente, o condicionador de sinal funciona como uma fonte de corrente variável. Com vista a minimizar o fenómeno de *aliasing*, à saída do condicionador foram adicionados filtros RC (passa-baixo, com  $R=42.5 \Omega$  e  $C=450 \text{ nF}$ ) com uma frequência de corte de 8.32 kHz, inferior à frequência de Nyquist (10 kHz) e superior à frequência máxima admitida pelo acelerómetro para os 3 eixos.



(a)



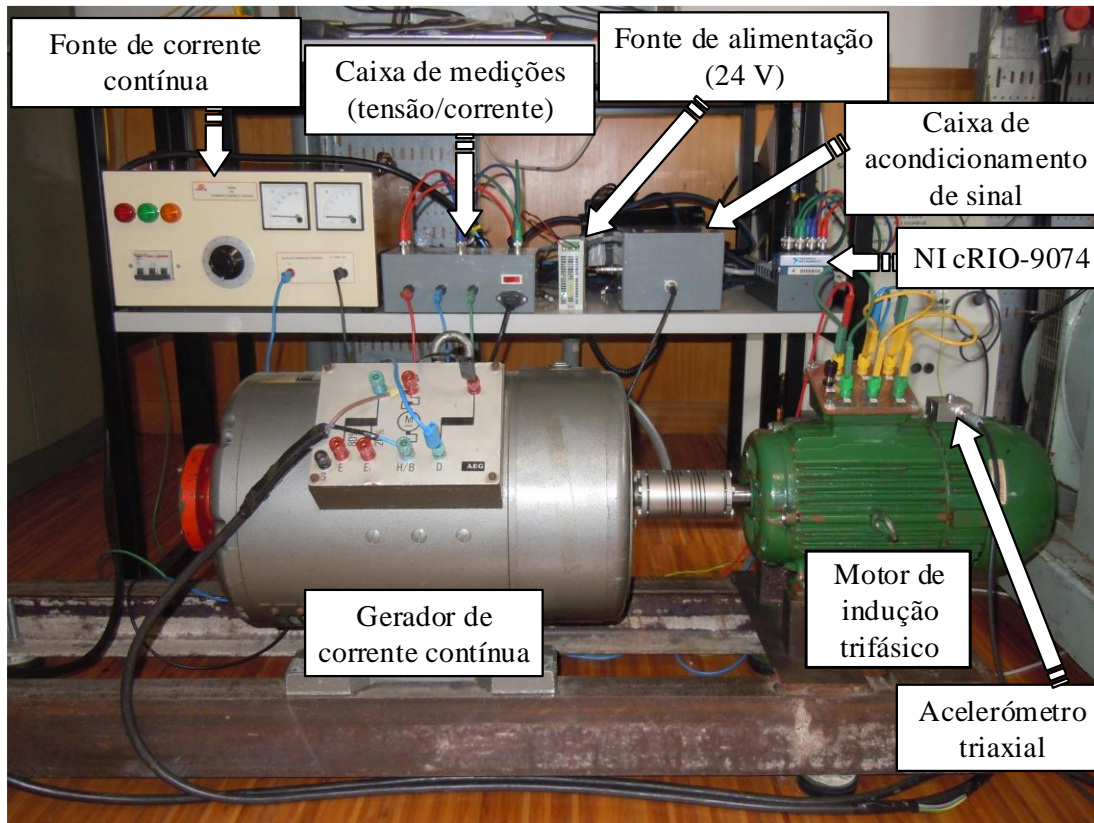
(b)

**Fig. 4.3 – Elementos constituintes do sistema de aquisição de sinais de vibração: (a) caixa com os condicionadores de sinal e filtros passa-baixo; (b) acelerómetro triaxial, fixado no MIT.**

Os sinais eléctricos foram adquiridos no cabo de alimentação do motor de indução trifásico. Os valores das correntes e tensões eléctricas foram adquiridos por intermédio de sensores de efeito *Hall* presentes na caixa de medições. Para ambas situações devem ser considerados os ganhos correspondentes, sendo para a corrente 3 e para a tensão 65.

Todos os sinais são transmitidos para o NI cRIO-9074, uma plataforma da *National Instruments* que combina uma FPGA com um sistema de controlo em tempo real. Esta plataforma necessita de módulos que permitam a aquisição dos sinais. Para o efeito foram utilizados os módulos NI 9215, cada um deles com 4 terminais BNC, que permitem a aquisição de 8 sinais analógicos. Nesse sentido, foram adquiridos sinais de vibração da carcaça do motor na direcção dos três eixos, provenientes do sistema de acondicionamento, e os sinais eléctricos das 3 tensões simples e de 2 correntes de alimentação do motor. A Fig. 4.4 mostra o setup experimental, onde se incluem os elementos acima caracterizados.





**Fig. 4.4 – Setup experimental.**

O interface com o utilizador é alcançado através do *software* LabVIEW, ferramenta da NI que permite, entre outras funcionalidades, o processamento de sinais através de um programa desenvolvido pelo utilizador. Em ambiente LabVIEW foi desenvolvido um ficheiro *.vi* que permite a definição da frequência de amostragem e o número de amostras para cada processo de aquisição de sinais. Neste processo, foi efetuada uma aquisição simultânea de sinais de vibração da carcaça do motor e de sinais elétricos, 3 tensões simples e 2 correntes de alimentação do motor, a uma frequência de amostragem de 20 kHz. Em cada ensaio foram recolhidas 65536 amostras, o que perfaz um tempo de aquisição total de 3.2768 segundos. Por conseguinte, a resolução espectral que se obtém dos sinais adquiridos é de 0.305 Hz, aproximadamente.

A análise realizada teve como ponto de partida a comparação entre técnicas com similar apresentação de resultados, tendo em conta os domínios onde estas se inserem. A implementação das técnicas no domínio da frequência (a FFT, a TH, o TKEO e a CZT), assim como as técnicas no domínio do tempo-frequência (WVD, STFT) e a transformada de onduleta, serão alvo de uma análise distinta.

Para se proceder a uma análise espectral dos sinais adquiridos, é necessário determinar as frequências características dos anéis externo e interno dos rolamentos utilizados. Estas frequências variam consoante o regime de carga sob o qual o motor se encontra em funcionamento. Para o motor

utilizado, foram realizados ensaios quando este se encontrava a funcionar em vazio (acoplado ao gerador), à meia carga e à plena carga. Na Tabela 5 são identificadas a velocidade e a frequência mecânica de rotação do rotor aos regimes de carga aplicados ao motor.

**TABELA 5 - VELOCIDADE E FREQUÊNCIA MECÂNICA DE ROTAÇÃO DO ROTOR AOS VÁRIOS REGIMES DE CARGA.**

REGIME DE CARGA	VELOCIDADE (RPM)	FREQUÊNCIA MECÂNICA DO ROTOR (Hz)
Vazio	1498	24.97
Meia Carga	1471	24.51
Plena Carga	1444	24.07

As frequências características dos anéis dos rolamentos utilizados são determinadas através de (3.4) e (3.5), estando indicadas na Tabela 6.

**TABELA 6 – FREQUÊNCIAS CARACTERÍSTICAS DOS ANÉIS EXTERNO E INTERNO DOS ROLAMENTOS PARA CADA REGIME DE CARGA.**

REGIME DE CARGA	ANEL INTERNO (Hz)	ANEL EXTERNO (Hz)
Vazio	134.88	89.88
Meia Carga	132.36	88.27
Plena Carga	129.96	86.65

## 4.2. Análise dos sinais de vibração da carcaça do motor

Conforme mencionado anteriormente, os sinais de vibração da carcaça do motor adquiridos são representativos de 3 direções do motor, axial, radial e tangencial. No entanto, analisando os resultados obtidos numa primeira série de resultados, foi possível concluir que na direção do eixo  $y$  (direção axial) o nível de vibração é desprezável, não sendo realizada a análise do sinal segundo este eixo nesta dissertação. Por conseguinte, apenas serão apresentados os sinais de vibração adquiridos na direção dos eixos  $x$  (direção tangencial) e  $z$  (direção radial), distinguindo-se os rolamentos utilizados (sem avaria, com furo único de 2 ou 4 mm, nos anéis externo ou interno) e o regime de carga sob o qual o motor se encontra em funcionamento (em vazio, meia ou plena carga) em cada ensaio.

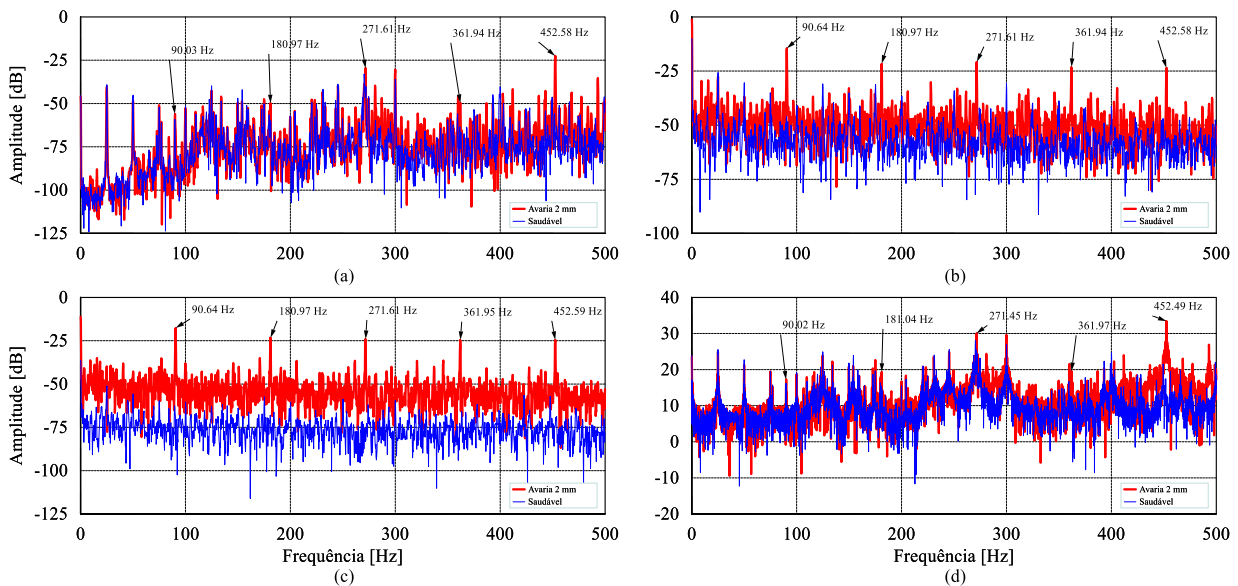
### 4.2.1. Avaria no anel externo

A aplicação das técnicas avançadas de processamento de sinal aos sinais de vibração da carcaça do motor com vista à identificação da avaria no anel externo dos rolamentos é alvo de análise neste ponto. No domínio da frequência, todos os espectros obtidos em que houve a necessidade de aplicação da FFT (aplicação da FFT, TH e TKEO), foi utilizada como janela espectral a janela de *Hanning*. A

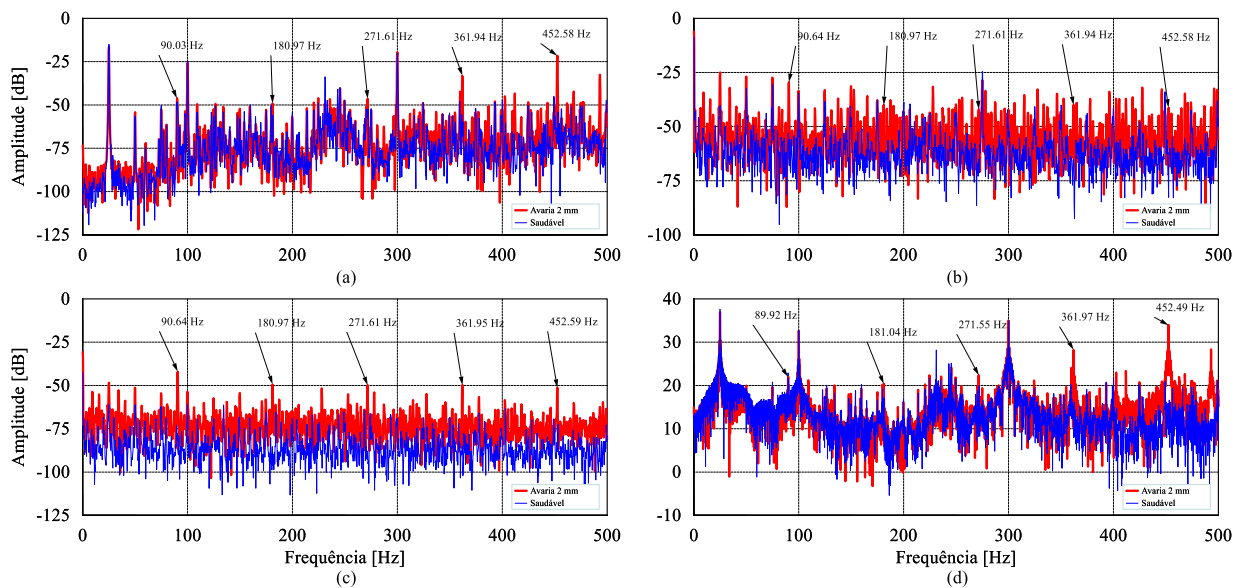
Fig. 4.5 apresenta espectros representativos do sinal de vibração da carcaça do motor na direção do eixo  $x$ .

Visualizando a escala utilizada, em decibéis, nos espectros de cada técnica, verifica-se que a aplicação da CZT origina valores significativamente mais elevados, quando comparada com a aplicação das restantes técnicas. Tal deve-se ao cálculo realizado na aplicação desta transformada, consistindo na operação de multiplicações e convoluções. Além disso, a CZT aqui aplicada caracteriza-se pela sua maior resolução espectral, face às outras técnicas. Nesse sentido, a resolução espectral que advém da aplicação da CZT é de 0.1 Hz.

Através da observação do conteúdo espectral da Fig. 4.5, é possível identificar as técnicas onde as componentes espectrais características da avaria (identificadas nos espectros) se distinguem facilmente no espectro. Neste caso, a aplicação do TKEO e da TH permite uma identificação mais fácil das componentes na gama de baixa frequência analisada (0-500 Hz). Contrapondo, a aplicação da FFT e da CZT não permite uma identificação clara das 3 primeiras componentes associadas à avaria nesta região espectral. Na Fig. 4.5(c), onde é visível o espectro resultante da aplicação do TKEO, o espectro do sinal adquirido na presença da avaria demonstra uma amplitude média superior à registada quando o motor funciona com rolamentos sem avarias.



**Fig. 4.5 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo  $z$  para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

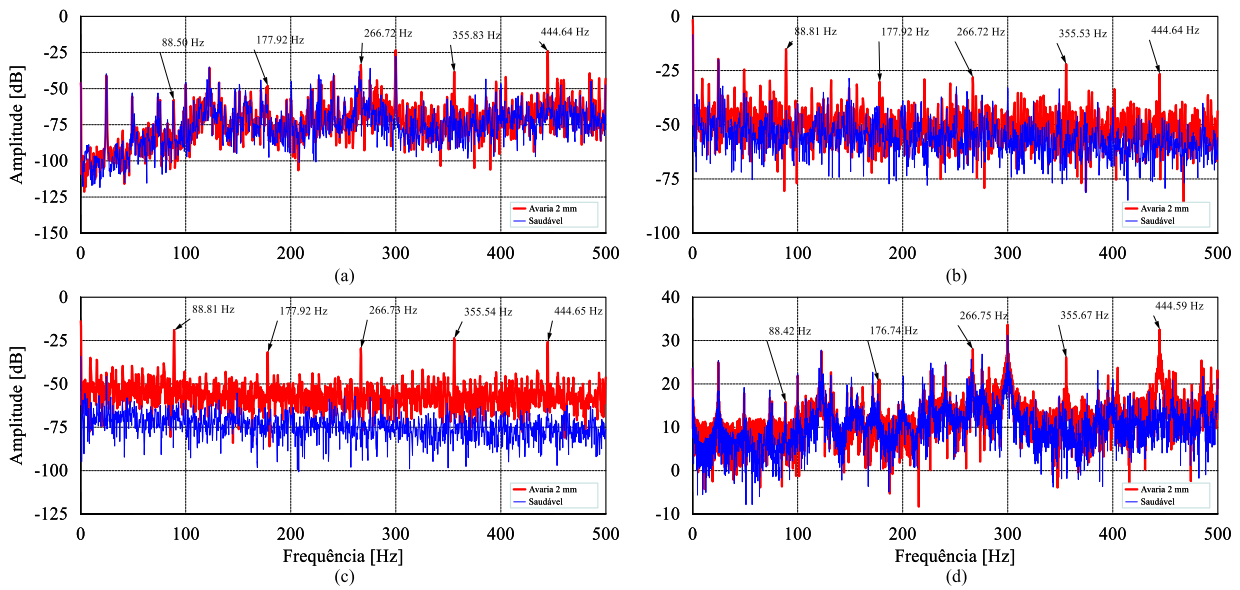


**Fig. 4.6 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo  $x$  para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

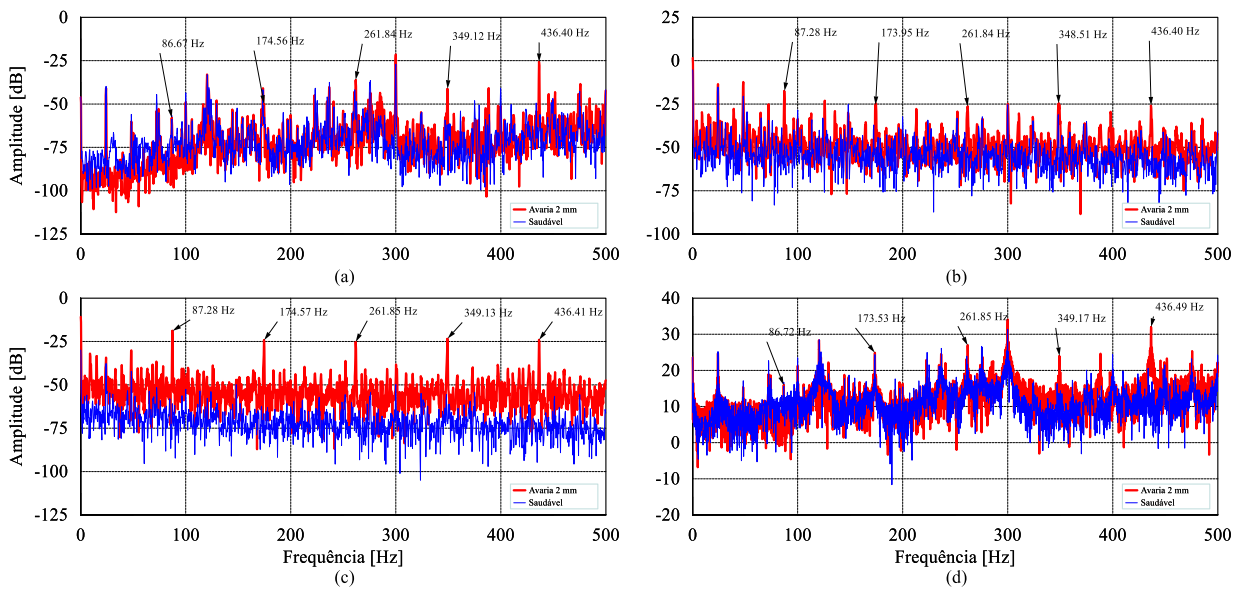
Na Fig. 4.6 estão representados espectros representativos dos sinais de vibração da carcaça do motor na direção do eixo  $x$ . Fazendo uma análise comparativa das Fig. 4.5 e Fig. 4.6, conclui-se que é precisamente na direção do eixo  $z$  que a avaria no anel externo dos rolamentos mais se manifesta. Os espectros resultantes da aplicação do TKEO e da TH não permitem uma identificação tão clara das componentes, sendo esta diferença mais visível quando aplicada a TH. As componentes confundem-se com algumas existentes nas regiões vizinhas do espectro, para o caso da TH. Comparando os espectros relativos ao TKEO, verifica-se que há uma redução da amplitude média do sinal espectral referente à avaria, mais próxima do sinal adquirido sem avaria. Os espectros obtidos através da aplicação da FFT e da CZT apresentam resultados semelhantes, relativamente aos 2 eixos.

Uma vez que é na direção do eixo  $z$  que se obtêm espectros que melhor permitem identificar a presença da avaria no anel externo dos rolamentos, os próximos casos serão analisados com base em espectros relativos a este eixo.

Quando o motor roda sob os outros regimes de carga testados, cujos espectros representativos se encontram presentes na Fig. 4.7 (funcionamento do motor à meia carga) e na Fig. 4.8 (funcionamento do motor à plena carga), além da deslocação das componentes espectrais características, em função da frequência mecânica de rotação do rotor, verifica-se um comportamento semelhante das componentes espectrais características da avaria, com exceção da aplicação da TH. Aplicando a TH, são visíveis nas Fig. 4.7(b) e Fig. 4.8(b) que para maiores níveis de carga são menores as amplitudes das componentes associadas à avaria, assim como da amplitude média do sinal relativo à avaria. A aplicação das restantes técnicas não mostra alterações significativas para os vários regimes de carga testados.

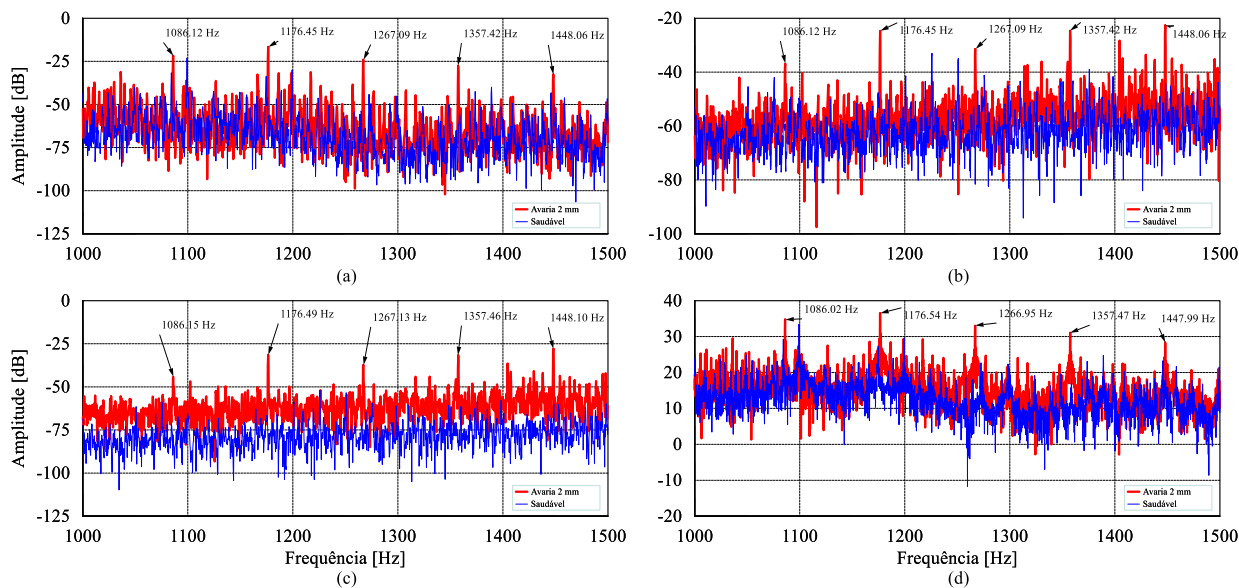


**Fig. 4.7 -** Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo z para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.



**Fig. 4.8 -** Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo z para o funcionamento do MIT à plena carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.

Para gamas de frequência mais altas, cujos espectros de uma região se encontram apresentados na Fig. 4.9, as frequências características da avaria distinguem-se mais facilmente aplicando todas as técnicas, devido às suas maiores amplitudes face às frequências vizinhas. Os espectros dos sinais obtidos da aplicação do TKEO e da TH apresentam um comportamento semelhante ao observado na região de baixa frequência, representada nas Fig. 4.5(b) e (c). Já os espectros obtidos da aplicação da FFT ou da CZT mostram uma maior facilidade na identificação da avaria a frequências mais altas, estando as componentes características da avaria claramente distintas do restante sinal.

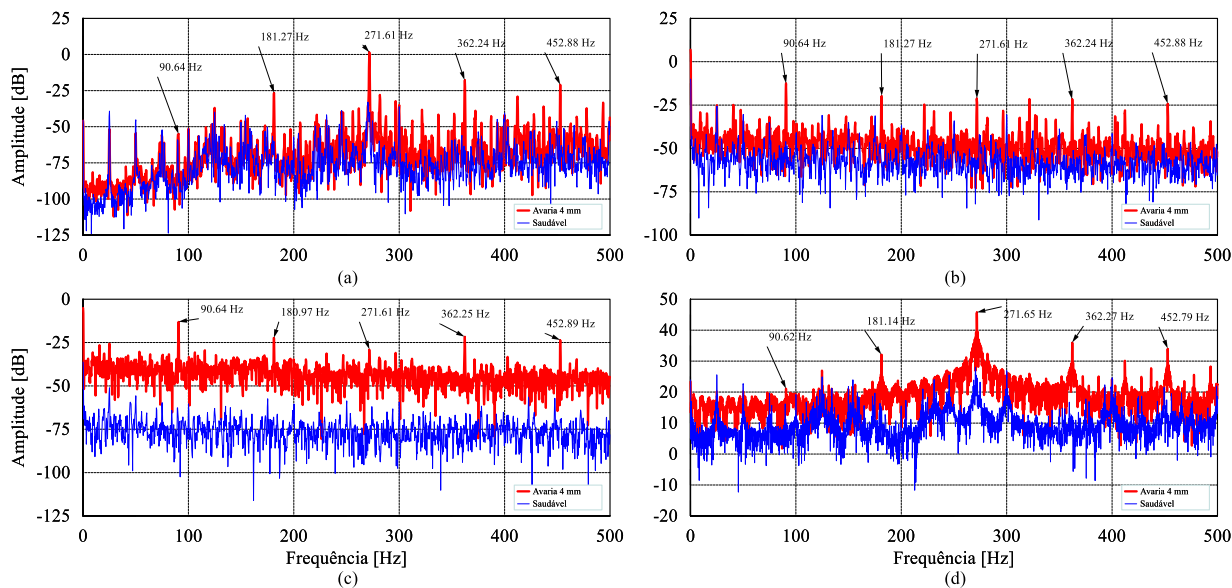


**Fig. 4.9 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo z para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

Perante um aumento da severidade da avaria, cujos espectros obtidos se apresentam na Fig. 4.10, há um claro aumento da amplitude das componentes características da avaria, na aplicação das técnicas estudadas. Além disso, nos espectros obtidos através da FFT e da CZT, identificam-se as frequências características da avaria mais baixas, em redor dos 90 Hz e dos 180 Hz, que não eram visíveis quando testada a avaria incipiente ao mesmo regime de carga, na Fig. 4.5.

Regista-se ainda um aumento da amplitude média da representação espectral do sinal nas aplicações do TKEO e da CZT. Apenas na situação que representa uma maior severidade da avaria se verifica um comportamento diferente da CZT e da FFT, contrastando com os espectros obtidos nas situações anteriormente analisadas. Nessas situações, apesar da diferença registada na escala dos espectros das duas técnicas, os espectros obtidos através da aplicação destas técnicas apresentam um comportamento semelhante no que respeita às componentes espectrais com maior amplitude.



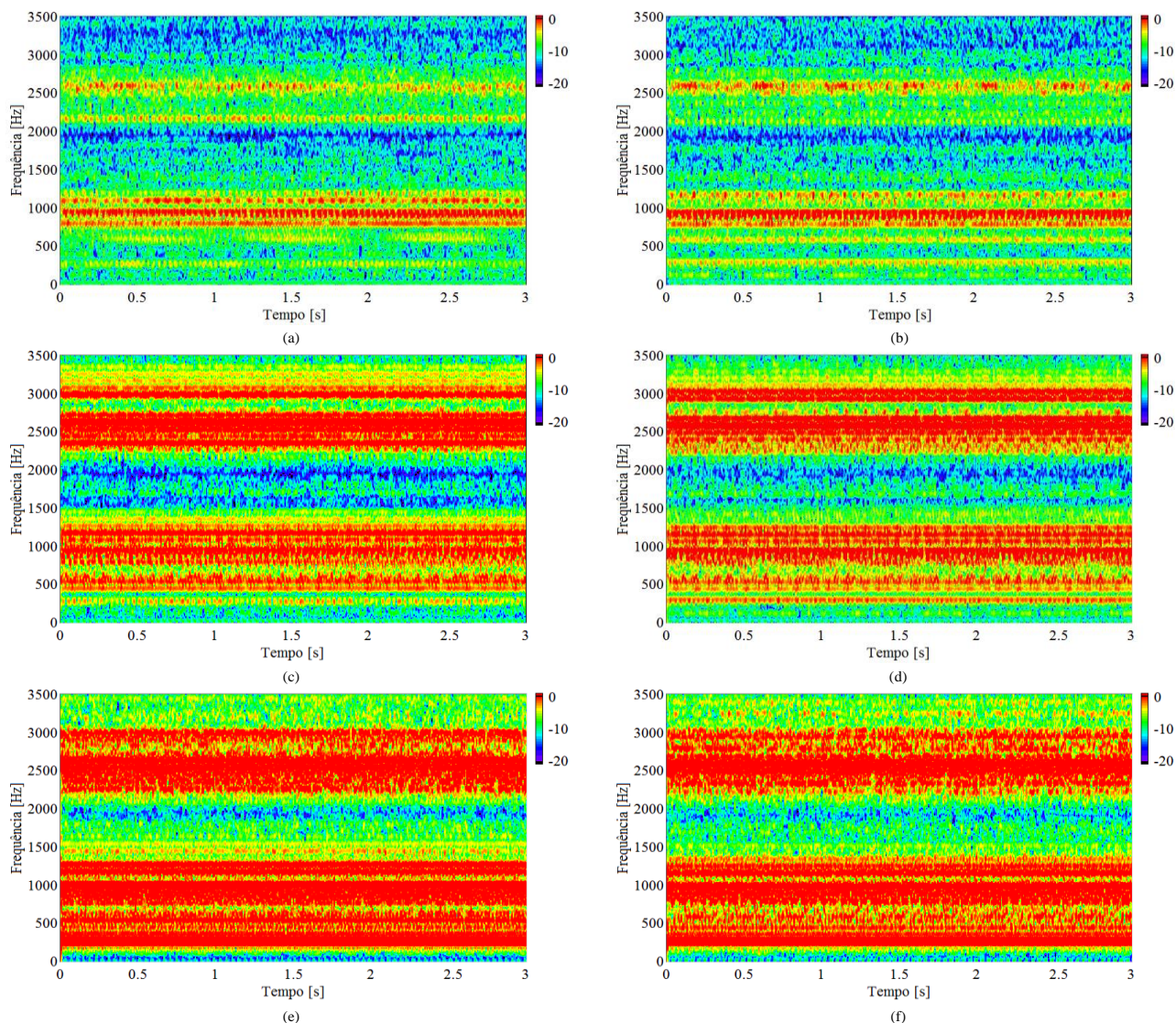


**Fig. 4.10 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo  $z$  para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

Relativamente às técnicas no domínio do tempo-frequência, foram aplicadas a STFT e a WVD. Quando se pretende aplicar técnicas no domínio do tempo-frequência é necessário proceder a uma seleção da janela espectral (apenas aplicável no caso da STFT), assim como a resolução espectral pretendida e o *overlap*. Devido a questões de processamento computacional (a utilização de uma maior resolução espectral implica uma maior utilização de recursos computacionais) e a uma prévia visualização de espectrogramas de diversas resoluções, optou-se por uma resolução espectral de 1.22 Hz.

Foram definidos 512 blocos temporais, com um *overlap* de 75%. Com vista à aplicação da STFT, foi escolhida a janela espectral de *Hanning* para obter o espectrograma. Nesse sentido, tendo como base os espectrogramas presentes nas Fig. 4.11 e Fig. 4.12, a aplicação deste tipo de técnicas permite-nos identificar gamas de frequência propensas a maiores amplitudes, assim como a evolução da amplitude das componentes espectrais no tempo, na presença de avarias em rolamentos.

Sob dois regimes de carga testados, com o motor a rodar em vazio e à meia carga, cujos espectrogramas obtidos através da aplicação da STFT se encontram na Fig. 4.11, verifica-se que, quando introduzida uma avaria no estado incipiente no anel externo dos rolamentos, há um aumento da amplitude das componentes espectrais nas bandas de frequência compreendidas entre 400 Hz e 1300 Hz e entre 2300 Hz e 3100 Hz.



**Fig. 4.11 - Espetrogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo z, com introdução de avarias no anel externo do rolamento do lado do ventilador, aplicando a STFT: (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB.**

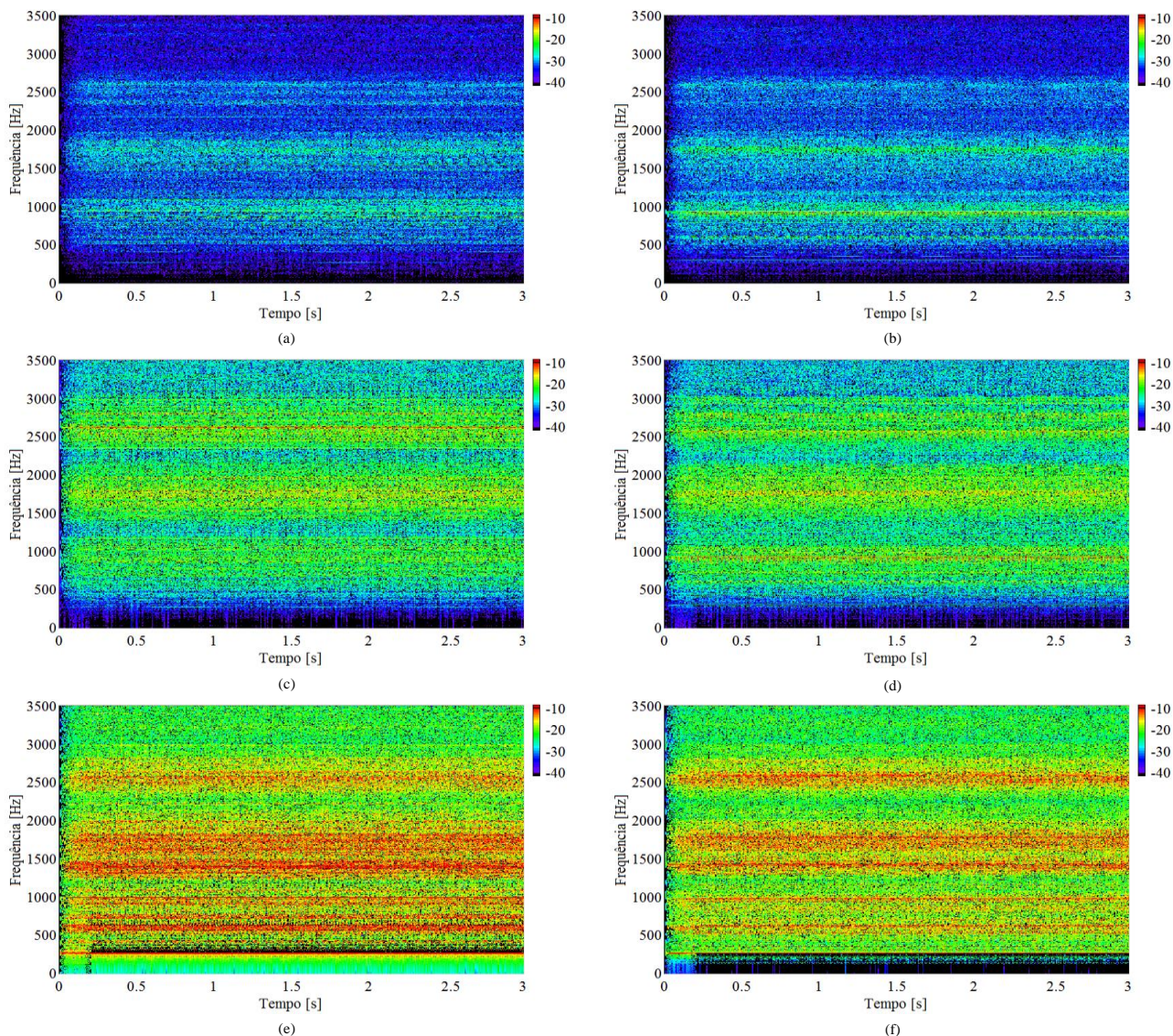
Para o caso extremo, verifica-se também um aumento da amplitude na região de baixa frequência (inferiores a 500 Hz). Não se registam diferenças significativas nos espectrogramas que representam a manifestação da avaria para os dois regimes de carga presentes na figura. Isto é, a avaria manifesta-se de igual modo nos dois regimes de carga representados. Além disso, observa-se uma evolução uniforme, no tempo, na amplitude das componentes espectrais do sinal de vibração da carcaça do motor.

A aplicação da WVD, ilustrada na Fig. 4.12, permite identificar, na presença de uma avaria menos severa no anel externo do rolamento, uma maior diferença na amplitude das componentes espectrais nas gamas de frequência compreendidas entre os 400 Hz e os 1200 Hz, os 1400 Hz e os 2100 Hz, e os 2300 e os 3000 Hz. Quando a avaria se encontra num estado mais avançado, regista-se um aumento generalizado na amplitude das componentes espectrais em todas as gamas de frequência. Outro facto



que resulta da análise efetuada aos espectrogramas é a uniformidade da amplitude das componentes espectrais no domínio do tempo. Assim como para a aplicação da STFT, a aplicação da WVD não revela diferenças significativas relacionadas com a manifestação da avaria variando o regime de carga.

As duas técnicas diferem no seu princípio de funcionamento, enquanto a WVD se baseia na densidade energética, pegando numa translação do próprio sinal, a STFT consiste na realização da FFT de forma parcelar, sob os vários blocos temporais.



**Fig. 4.12 -** Espetrogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo z, com introdução de avarias no anel externo do rolamento do lado do ventilador, aplicando a WVD: (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB.

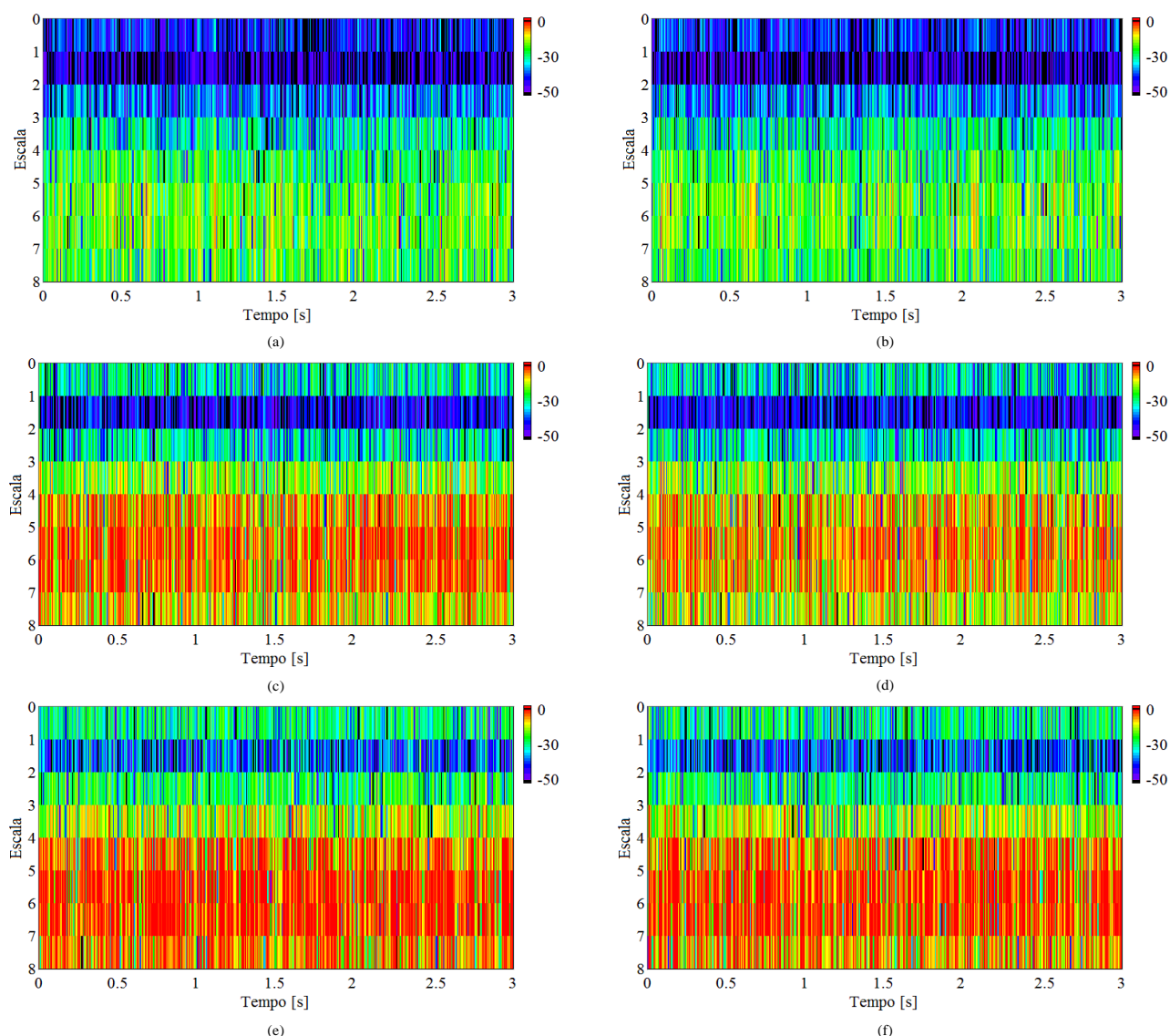
A aplicação da transformada de onduleta obriga a proceder à escolha da onduleta-mãe mais adequada. Na situação da aplicação da CWT, a escolha recaiu sobre a onduleta *Morlet*, visto que esta se apresenta na literatura como uma opção bastante utilizada no diagnóstico de avarias, em virtude dos bons resultados obtidos no processamento de sinais não-estacionários [36, 54, 55]. No que respeita à aplicação da DWT através da MRA, foi utilizada uma onduleta *Daubechies*, nome de uma família de onduletas ortogonais, caracterizada pelo número de momentos nulos que comporta. Estas onduletas têm como característica o facto de serem assimétricas, sendo bastante popular a sua aplicação. Neste trabalho foi implementada a onduleta *Daubechies 14* (db14) como onduleta-mãe, visto que resultados presentes na literatura reportam maior eficácia utilizando onduletas-mãe com maior número de momentos nulos [37, 56]. No ANEXO III estão presentes as representações das funções escala e onduleta-mãe da onduleta *Daubechies 14* e da função da onduleta *Morlet*.

A transformada de onduleta caracteriza-se pela sua natureza escalar. A cada escala corresponde um nível de decomposição, estando as bandas de frequência associadas a cada nível identificadas na Tabela 7.

**TABELA 7 – BANDAS DE FREQUÊNCIA, ASSOCIADAS AOS COEFICIENTES, OBTIDAS ATRAVÉS DA DECOMPOSIÇÃO DO SINAL EM MULTINÍVEIS.**

NÍVEL (j)	BANDAS DE APROXIMAÇÃO (Hz)		BANDAS DE DETALHE (Hz)	
1	A1	[0, 5000]	D1	[5000, 10000]
2	A2	[0, 2500]	D2	[2500, 5000]
3	A3	[0, 1250]	D3	[1250, 2500]
4	A4	[0, 625]	D4	[625, 1250]
5	A5	[0, 312.5]	D5	[312.5, 625]
6	A6	[0, 156.25]	D6	[156.25, 312.5]
7	A7	[0, 78.125]	D7	[78.125, 156.25]
8	A8	[0, 39.0625]	D8	[39.0625, 78.125]

Na análise dos sinais de vibração apenas faz sentido observar o comportamento dos níveis superiores a 3. Conforme se verifica na Fig. 4.13, nos escalogramas respeitantes à avaria no anel externo quando o motor funciona em vazio ou à meia carga, os níveis de escala compreendidos entre 5 e 7 têm um aumento mais acentuado da amplitude, sendo perfeitamente detetada a avaria menos severa (furo de 2 mm). As restantes escalas, passíveis de análise neste domínio, também registam uma variação nas suas amplitudes. O escalograma apenas apresenta os coeficientes de detalhe do sinal.



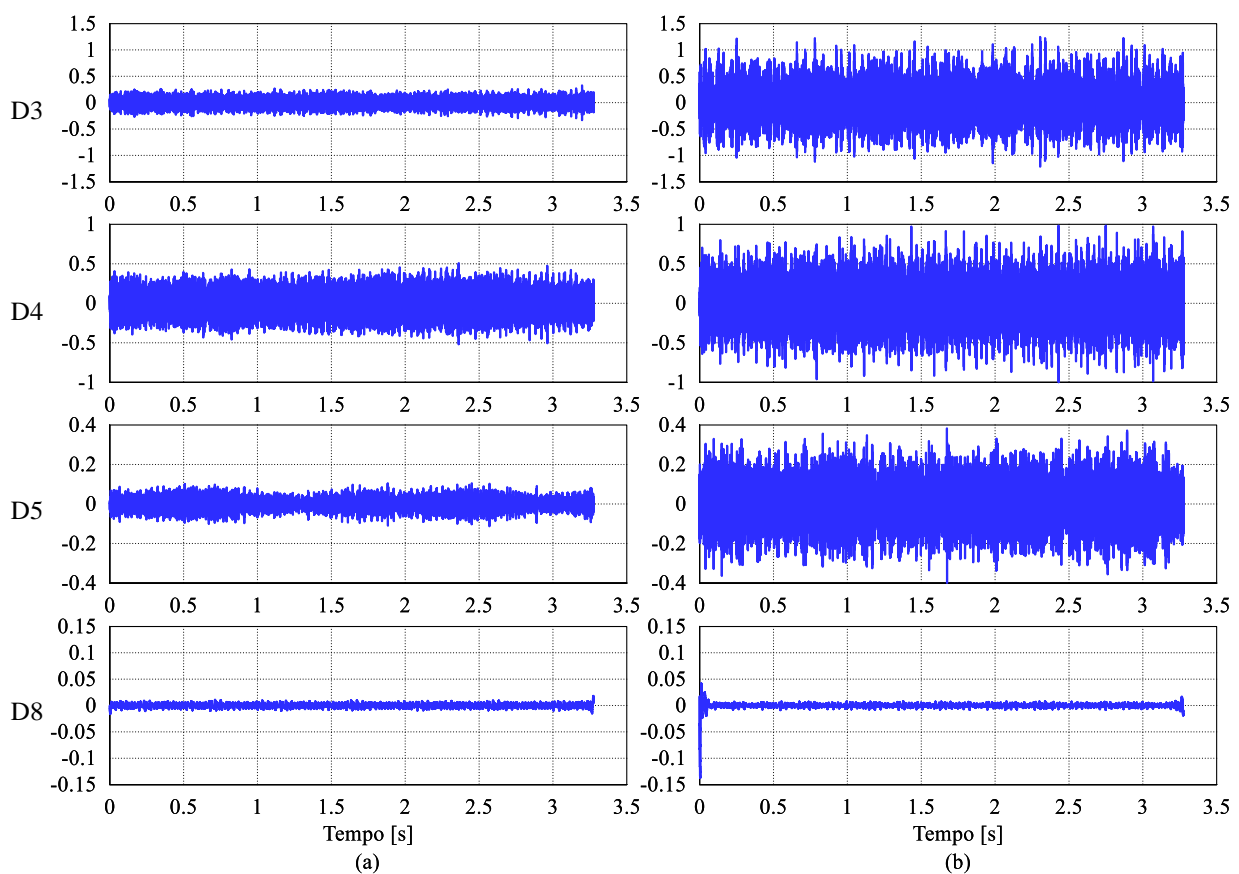
**Fig. 4.13 - Escalogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo z, com introdução de avarias no anel externo do rolamento do lado do ventilador, aplicando a CWT (onduleta *Morlet*): (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB.**

A reconstrução do sinal relativo aos coeficientes permite, no domínio do tempo, identificar as gamas de frequência onde a avaria se manifesta com maior intensidade. Outra ferramenta muito utilizada neste tipo de análise é o cálculo da energia para cada um dos níveis. O cálculo da energia do sinal obedece ao Teorema de Parseval, que consiste no somatório do quadrado do sinal reconstruído.

A aplicação da db14 sugere uma maior diferenciação nos coeficientes dos níveis compreendidos entre 3 e 6. Conforme se constata na Tabela 8, a energia de cada nível do sinal sofre alterações de grande magnitude, sendo mais visível a níveis inferiores (com destaque para os níveis 3 e 5) no caso da avaria de menor severidade, e também a frequências mais baixas, para o caso da avaria de maior severidade. Na Fig. 4.14 é possível verificar o aumento da intensidade do sinal perante uma situação de avaria em alguns coeficientes, obtidos através da reconstrução do sinal.

**TABELA 8 – ENERGIA, E RESPECTIVA VARIAÇÃO, CORRESPONDENTE AOS COEFICIENTES DO SINAL, PARA A SITUAÇÃO PRESENTE NA FIG. 4.14.**

Coeficientes	Saudável (J)	Avaria 2 mm (J)	$\Delta$ 2 mm	Avaria 4 mm (J)	$\Delta$ 4 mm
D3	$4.56 \cdot 10^{-3}$	$6.84 \cdot 10^{-2}$	1400%	$1.48 \cdot 10^{-1}$	3146%
D4	$2.03 \cdot 10^{-2}$	$5.97 \cdot 10^{-2}$	194%	$3.12 \cdot 10^{-1}$	1437%
D5	$8.19 \cdot 10^{-4}$	$1.12 \cdot 10^{-2}$	1268%	$1.49 \cdot 10^{-1}$	18093%
D6	$6.13 \cdot 10^{-4}$	$1.15 \cdot 10^{-3}$	88%	$7.10 \cdot 10^{-1}$	115724%
D7	$1.12 \cdot 10^{-4}$	$9.74 \cdot 10^{-5}$	-13%	$4.16 \cdot 10^{-4}$	271%
D8	$2.15 \cdot 10^{-5}$	$4.03 \cdot 10^{-5}$	87%	$1.46 \cdot 10^{-4}$	579%
A8	$7.80 \cdot 10^{-5}$	$1.61 \cdot 10^{-4}$	106%	$3.81 \cdot 10^{-4}$	388%



**Fig. 4.14 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes na direção do eixo z, utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio: (a) usando um rolamento saudável, (b) usando um rolamento com furo de 2 mm no anel externo do lado do ventilador.**

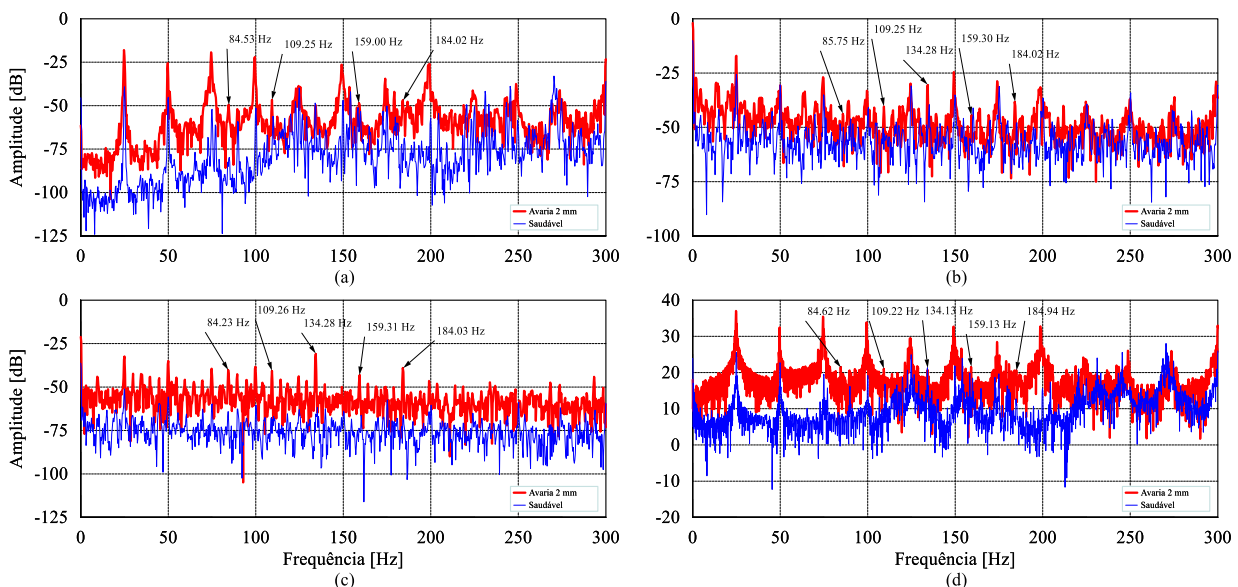


## 4.2.2. Avaria no anel interno

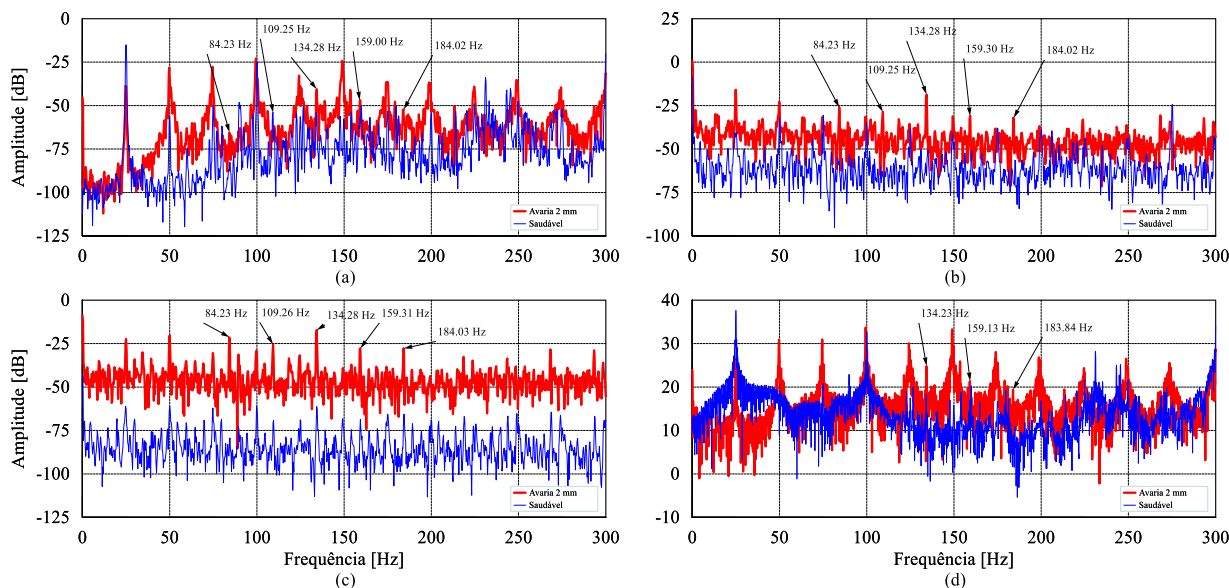
Neste ponto será apresentada a análise de sinais de vibração da carcaça do motor com a introdução de avarias no anel interno dos rolamentos. O anel interno dos rolamentos está em contacto com o veio do motor, girando à velocidade de rotação do veio, razão pela qual surgirão diversas componentes espectrais que se relacionam com a frequência característica do anel e com a frequência mecânica de rotação do rotor, tal como está indicado em (3.7).

Analisando os espectros obtidos através da aplicação das técnicas FFT, TKEO, TH e CZT, aos sinais de vibração da carcaça do motor obtidos na direção do eixo  $z$ , presentes na Fig. 4.15, observa-se que a aplicação do TKEO permite uma melhor identificação das componentes espectrais características da avaria, uma vez que estas se destacam da vizinhança. Conforme foi visualizado no ponto anterior, para o caso da avaria no anel externo, a amplitude média do espectro do sinal relativo ao cenário com avaria é superior à registada quando o motor funciona com os rolamentos saudáveis.

A utilização da FFT e da CZT não permite a clara identificação das componentes características da avaria. A maioria das componentes não apresentam amplitudes que permitam distingui-las facilmente no espectro, verificando-se um claro aumento da amplitude das componentes espectrais múltiplas da frequência mecânica de rotação do rotor. O uso da TH não permite a identificação de algumas componentes espectrais associadas à avaria. Esta técnica também apresenta no seu espectro amplitudes elevadas nas frequências múltiplas da frequência mecânica de rotação do rotor.



**Fig. 4.15 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo  $z$  para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**



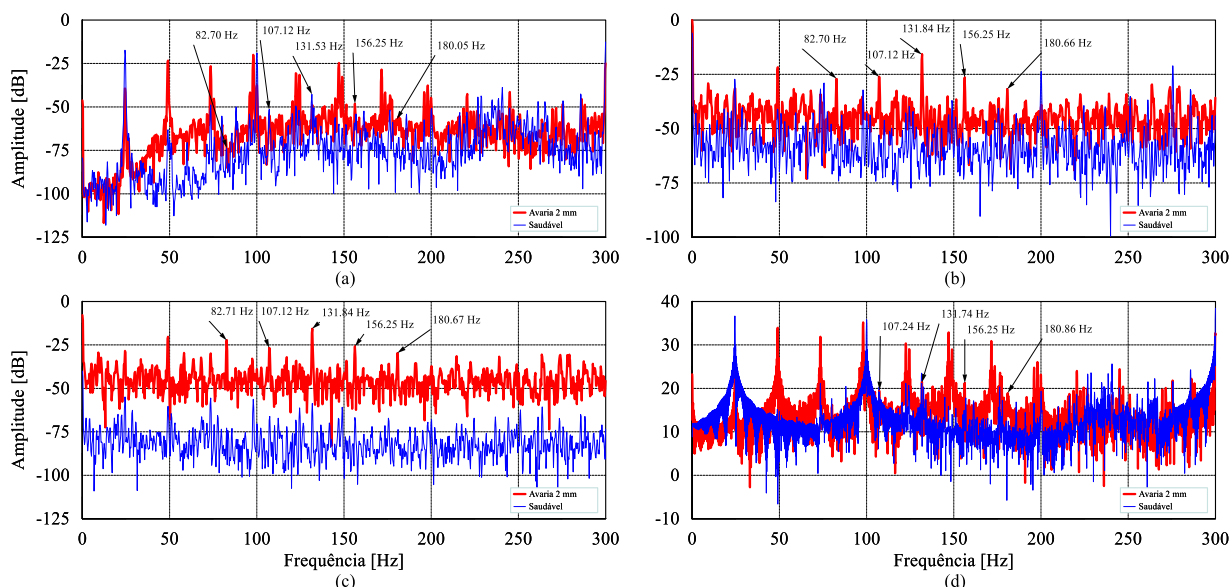
**Fig. 4.16 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo  $x$  para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

Ao contrário do registado para a avaria no anel externo dos rolamentos, é na direção do eixo  $x$ , correspondente à direção tangencial do motor, que mais se manifesta uma avaria no anel interno. Na Fig. 4.16 estão apresentados os espectros relativos à aplicação das técnicas aos sinais de vibração da carcaça segundo esse mesmo eixo. A aplicação do TKEO resulta na maior diferença da amplitude média da representação espectral do sinal obtido no teste com um rolamento avariado (com um furo de 2 mm no anel interno) em relação ao registado com rolamentos saudáveis. Nos espectros das outras técnicas também se identificam melhorias face aos espectros obtidos a partir de sinais de vibração relativos ao eixo  $z$ . A utilização da TH permite uma fácil identificação das componentes espectrais características da avaria, registando-se também uma amplitude média superior no espectro do sinal no caso da avaria, embora a diferença entre as amplitudes médias dos espectros seja menor do que a registada quando utilizado o TKEO.

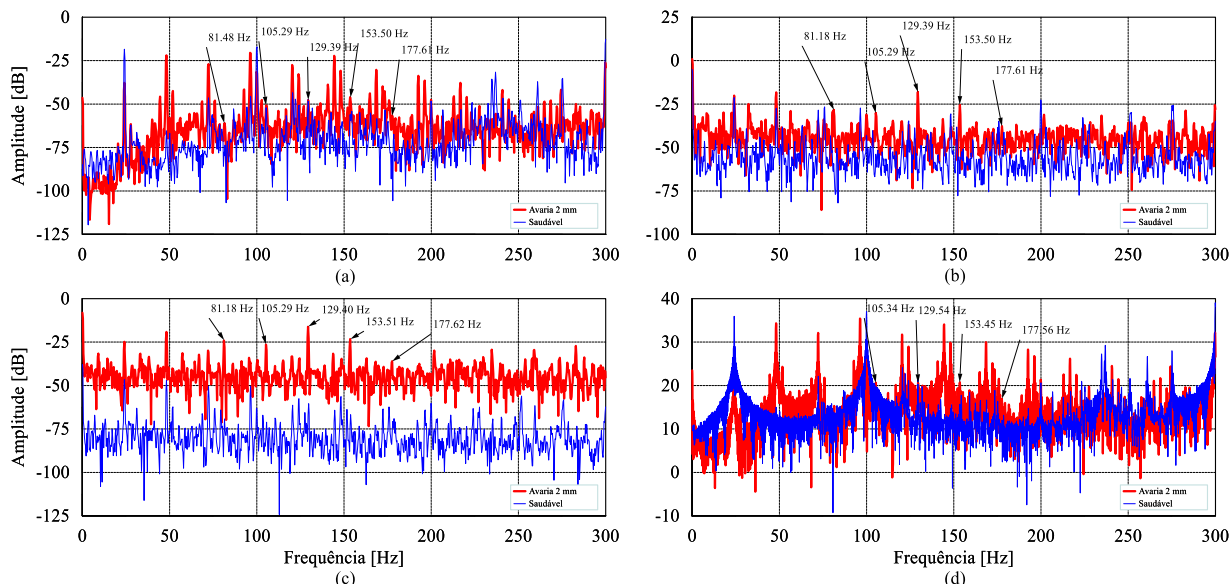
Tal como para o eixo  $z$ , os espectros obtidos dos sinais de vibração no eixo  $x$  através da aplicação das técnicas FFT e CZT não permitem uma identificação convincente das componentes espectrais relacionadas com a presença da avaria. Identifica-se com clareza apenas a frequência característica do anel interno (a rondar os 135 Hz), sendo esta a componente com maior amplitude nos espectros obtidos através da aplicação das restantes técnicas. Tendo em conta os resultados obtidos nos dois eixos na deteção de avarias no anel interno dos rolamentos, as situações que serão apresentadas de seguida dizem respeito a sinais de vibração adquiridos no eixo  $x$ .

Com o motor a rodar a outros regimes de carga, salvo algumas exceções, as componentes espectrais associadas à manifestação da avaria surgem de igual modo. Nas Fig. 4.17 (espectros obtidos quando o motor funciona sob o regime de meia carga) e Fig. 4.18 (representativa da situação de plena carga)

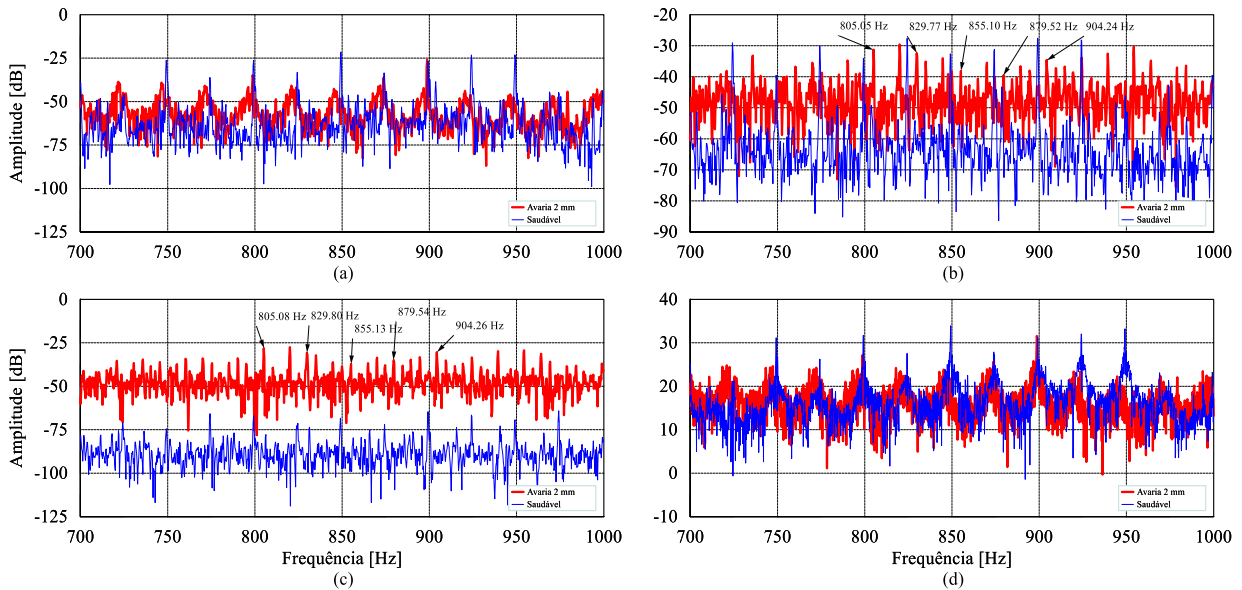
identificam-se algumas diferenças, especialmente em relação à aplicação da TH. Esta transformada permite uma melhor identificação das componentes para situações em que o nível de carga é menor. Com o aumento da carga as componentes espectrais características da avaria apresentam menor amplitude, além de se verificar uma menor diferença da amplitude média nas representações espectrais dos sinais entre as situações com e sem avaria. A aplicação das outras técnicas não regista alterações significativas nos espectros obtidos, em função do regime de carga do motor.



**Fig. 4.17 -** Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo  $x$  para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.



**Fig. 4.18 -** Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo  $x$  para o funcionamento do MIT à plena carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.



**Fig. 4.19 - Espectros representativos de sinais de vibração na direção do eixo  $x$  para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

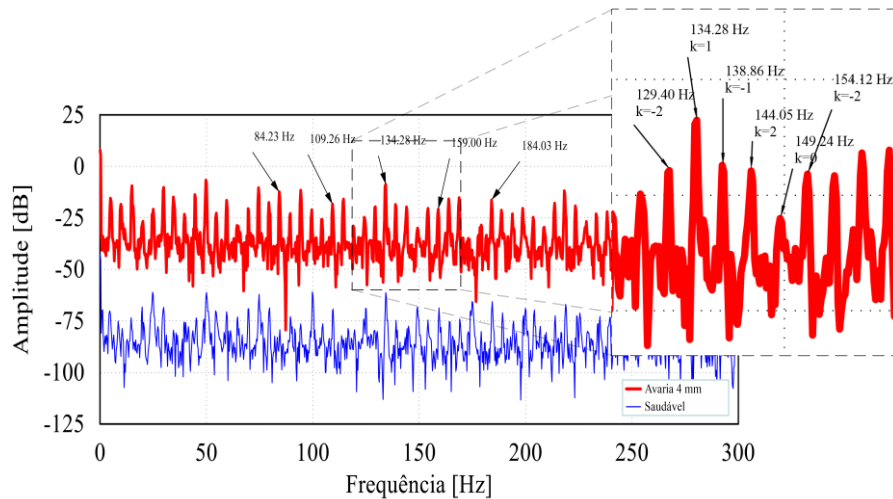
Na Fig. 4.19 são apresentados espectros relativos a uma gama de frequência mais elevada. Para este caso mantém-se o paradigma registado a baixas frequências. A aplicação da TKEO e da TH permite identificar as componentes espectrais características da avaria, com maior ênfase para o operador utilizado, enquanto a utilização das outras técnicas não permite a deteção das componentes espectrais.

Observa-se nos espectros obtidos a partir do TKEO e da TH a existência de componentes espectrais, além das identificadas, com amplitude significativa, que surgem em intervalos de aproximadamente 5 Hz. Tendo presente (3.7), verificamos que a determinação das frequências características da avaria identificáveis nos sinais de vibração da carcaça no anel interno dos rolamentos deriva da frequência característica do anel interno  $f_i$ . Além de considerar as frequências características relacionadas com  $f_i$  (cuja identificação tem estado presente nos espectros analisados), também considera a existência de frequências características relacionadas com  $-f_i$ . Se for associado a estes termos o fator multiplicativo 2, ou seja, considerando  $2f_i$  e  $-2f_i$ , obtemos a seguinte equação:

$$f_{BPI} = k \cdot f_i + m \cdot f_r, \quad k = \pm 1, \pm 2, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4.1)$$

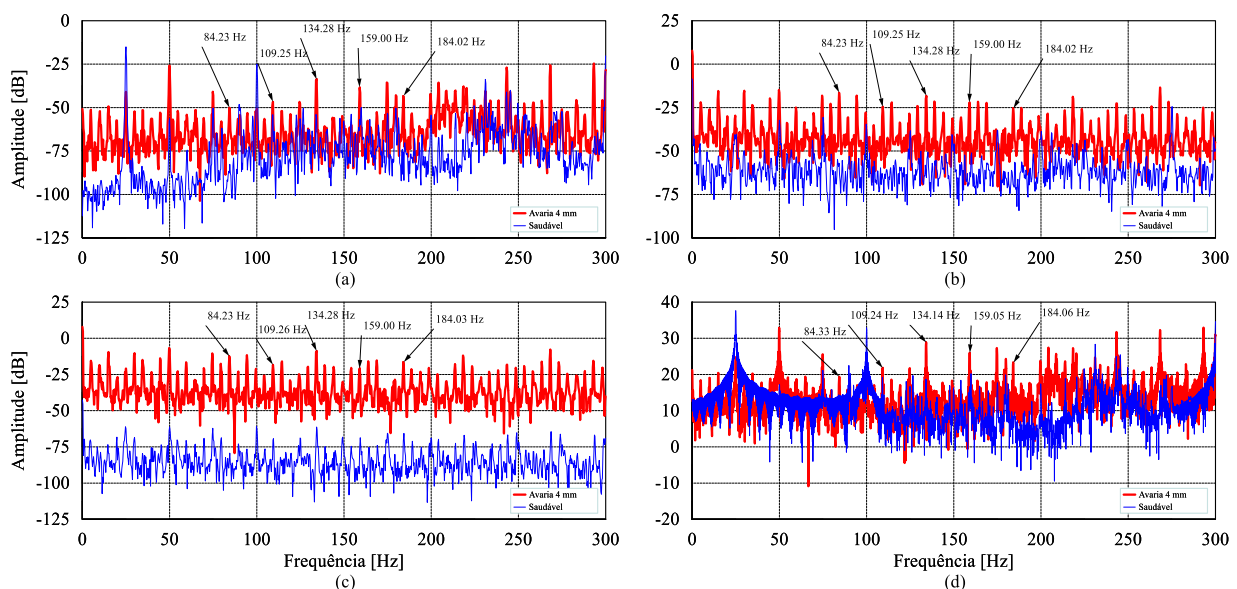
Aplicando esta equação, as frequências características da avaria identificáveis nos sinais de vibração encontram-se intercaladas aproximadamente 5 Hz. Estas componentes são visíveis em alguns espectros já analisados, dos quais se destacam os obtidos através da aplicação do TKEO e da TH na Fig. 4.19. Na Fig. 4.20 estão identificadas algumas das componentes espectrais, obtidas através de (4.1), que resulta da aplicação do TKEO quando testada a avaria mais severa.





**Fig. 4.20** – Espetro representativo de sinais de vibração na direção do eixo  $x$  para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando o TKEO.

Testando uma avaria com maior grau de severidade, cujos espectros obtidos estão presentes na Fig. 4.21, verifica-se uma maior amplitude das componentes espectrais derivadas de (4.1), sendo visíveis nos espectros representativos das várias técnicas, mais facilmente identificáveis quando aplicados o TKEO e a TH. A FFT e a CZT permitem a identificação das componentes relacionadas com a avaria, ao contrário do que se visualizava quando testada a avaria menos severa. No entanto, a amplitude média do sinal obtido na situação de avaria é semelhante ao obtido quando o motor gira com rolamentos saudáveis, assemelhando-se as componentes espectrais que permitem a identificação da avaria nos espectros relativos às duas situações.

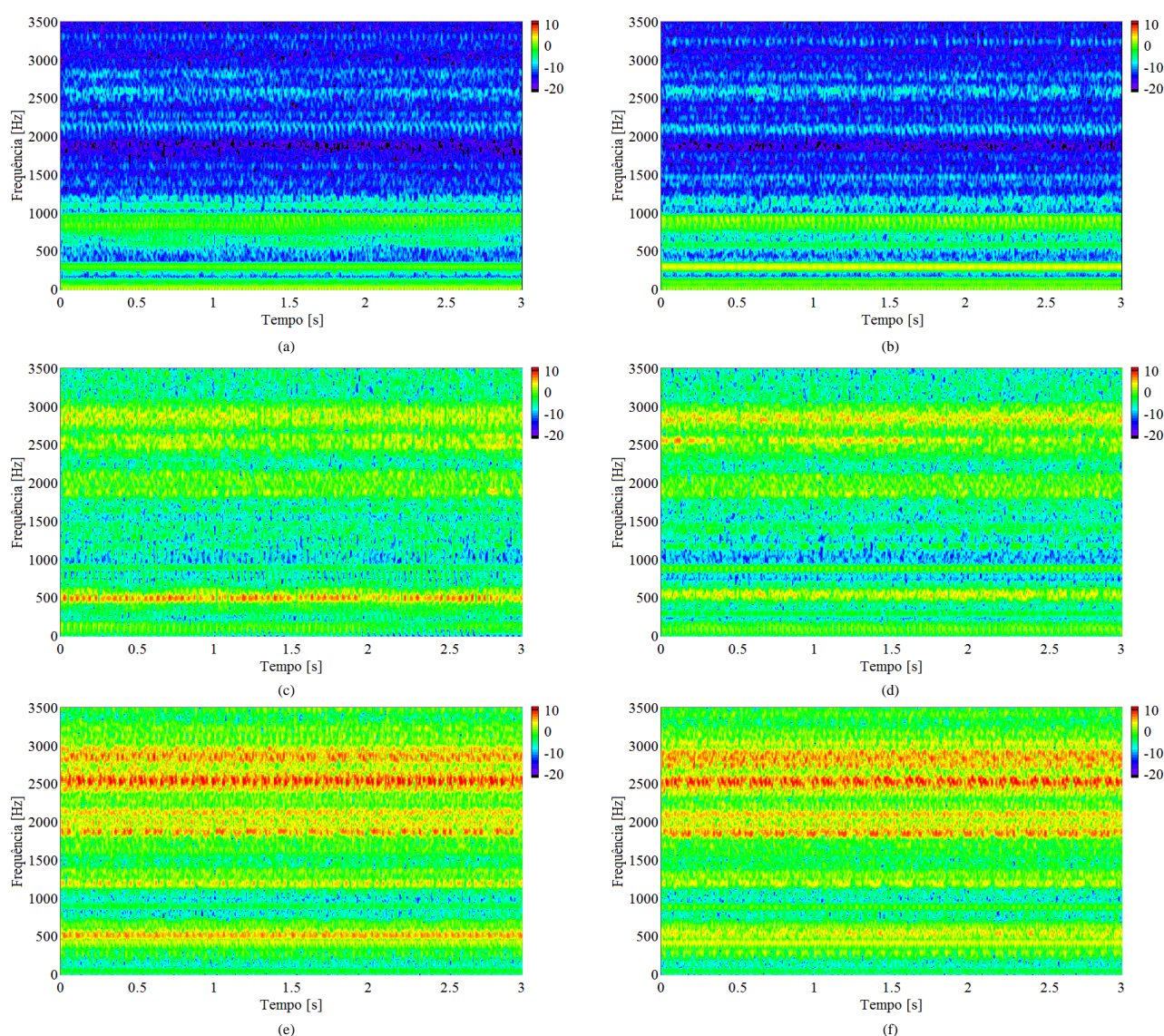


**Fig. 4.21** - Espetros representativos de sinais de vibração na direção do eixo  $x$  para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.

Prosseguindo com a análise, no domínio do tempo-frequência, as Fig. 4.22 e Fig. 4.23, associadas à aplicação das técnicas STFT e WVD respetivamente, permitem identificar as gamas de frequência

em que as componentes espectrais do sinal de vibração da carcaça do motor apresentam maior amplitude, dependendo da severidade da avaria e do regime de carga sob qual o motor se encontra em funcionamento.

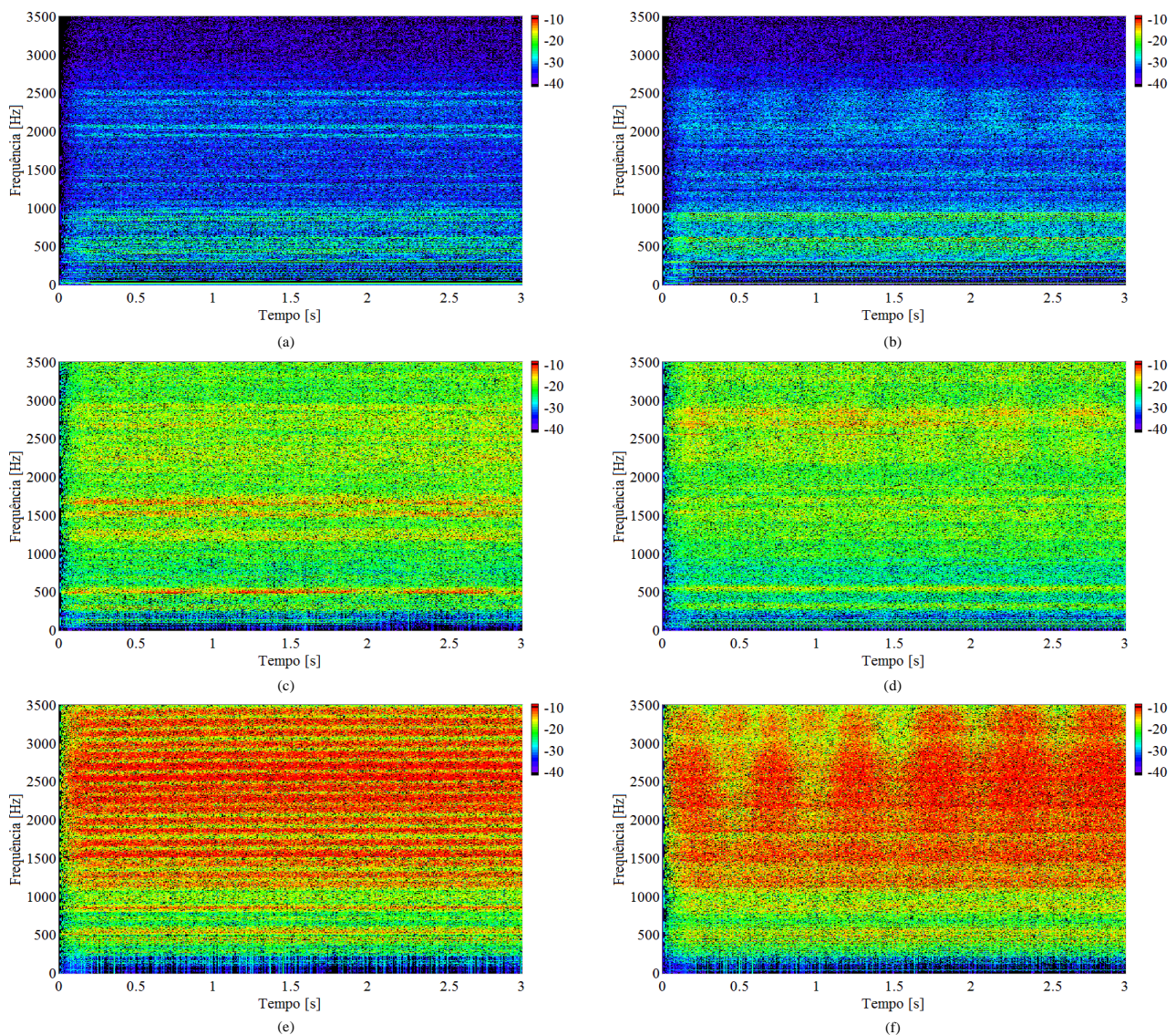
Relativamente à Fig. 4.22, perante uma avaria de menor severidade, verifica-se um aumento generalizado da amplitude do sinal para frequências acima de 1000 Hz, assim como para frequências próximas dos 500 Hz. Verifica-se ainda um maior aumento da amplitude do sinal para frequências próximas dos 2000 Hz, nos vários regimes de carga. Perante uma avaria mais severa verifica-se uma intensificação da amplitude do sinal acima dos 1000 Hz, com maior ênfase na gama compreendida entre os 1800 Hz e os 3000 Hz.



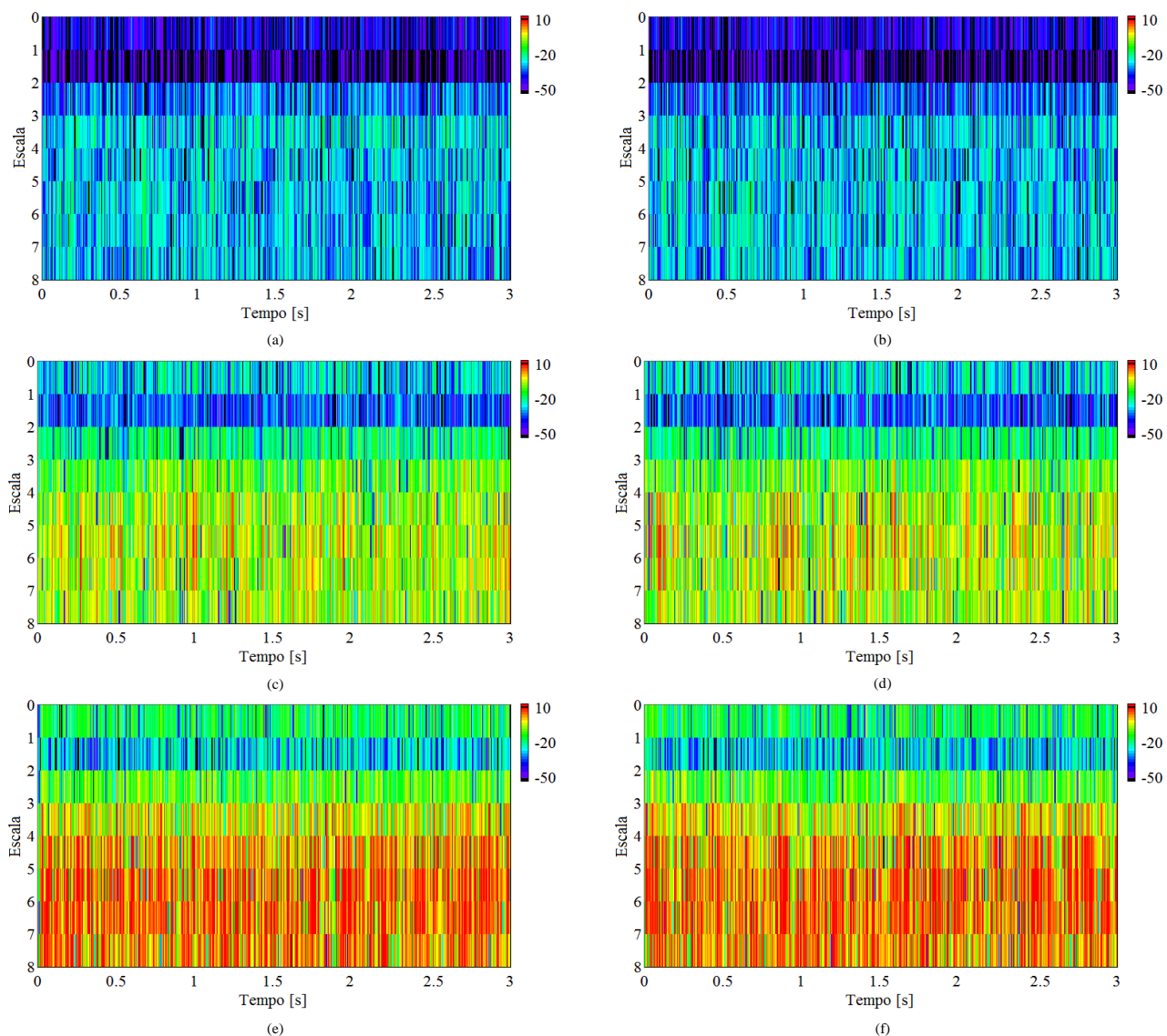
**Fig. 4.22 - Espetrogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo  $x$ , com introdução de avarias no anel interno do rolamento do lado do ventilador, aplicando a STFT: (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB.**



A aplicação da WVD, presente na Fig. 4.23, regista um aumento da amplitude das componentes espectrais em toda a região do espectrograma, havendo regiões onde essa variação é maior. As bandas de frequência onde se registam maior variação da amplitude são diferentes, dependendo do regime de carga. Funcionando em vazio, a gama de frequências compreendida entre 1250 Hz e 1750 Hz, assim como as frequências próximas de 500 Hz, apresentam um aumento da amplitude do sinal mais acentuado, ao passo que funcionando à meia carga a amplitude do sinal é maior na gama de frequências entre os 2500 Hz e os 3000 Hz. Perante uma avaria mais severa (Fig. 4.23(e) e (f)), visualizam-se nos espectrogramas um claro aumento da amplitude a frequências mais altas.



**Fig. 4.23 -** Espetrogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo  $x$ , com introdução de avarias no anel interno do rolamento do lado do ventilador, aplicando a WVD: (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB.



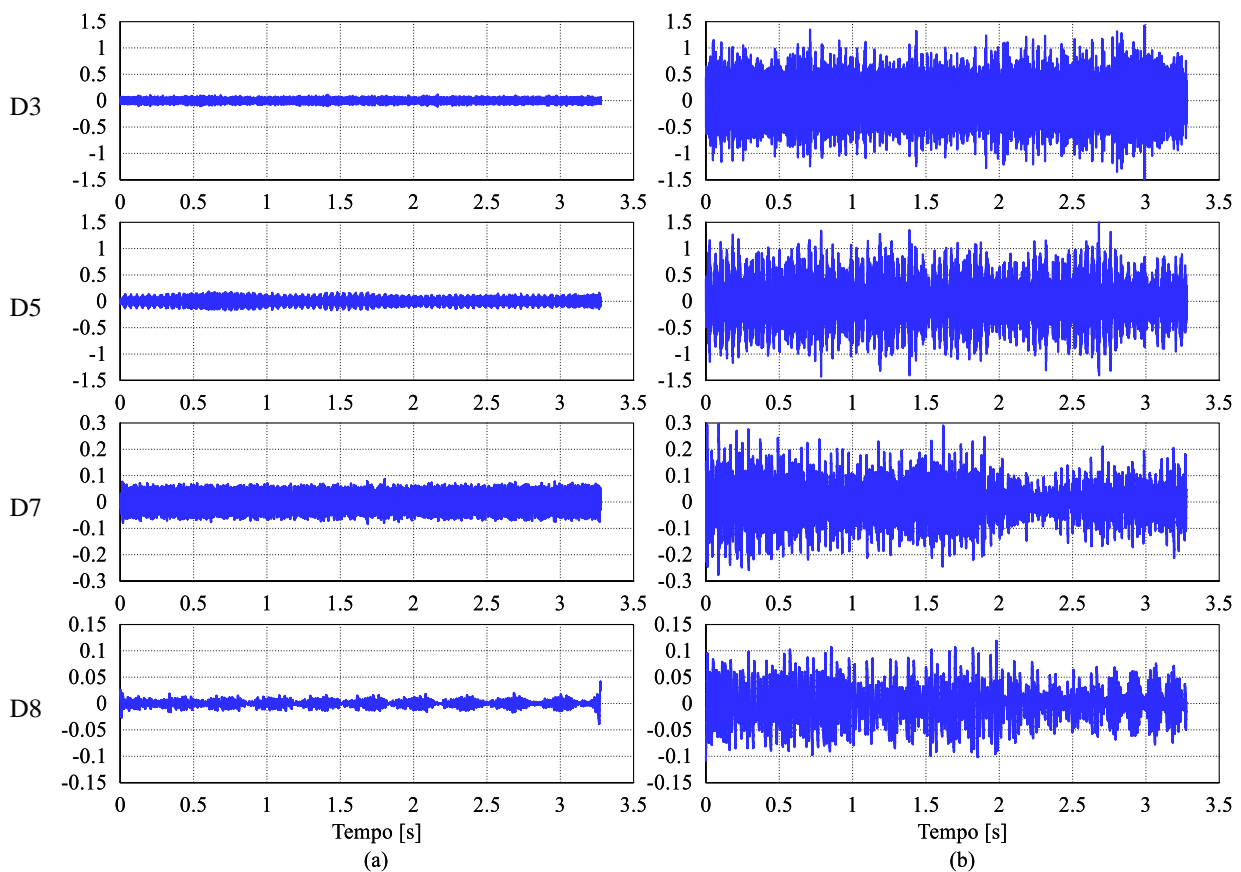
**Fig. 4.24 - Escalogramas representativos de sinais de vibração na carcaça na direção do eixo  $x$ , com introdução de avarias no anel interno do rolamento do lado do ventilador, aplicando a CWT (onduleta *Morlet*): (a) sem avaria, em vazio; (b) sem avaria, à meia carga; (c) com avaria de 2 mm, em vazio; (d) com avaria de 2 mm, à meia carga; (e) com avaria de 4 mm, em vazio; (f) com avaria de 4 mm, à meia carga, com escalas em dB.**

Visualizando a Fig. 4.24, onde se aplica a onduleta *Morlet*, constata-se o aumento da amplitude nos escalogramas para as escalas passíveis de análise, da 3<sup>a</sup> à 8<sup>a</sup>, à semelhança do que acontece para a avaria no anel externo. Este fenómeno é comum a todos os níveis de carga, salientando-se as 5<sup>a</sup>, 6<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> escalas com maior aumento da amplitude.

A aplicação da DWT, utilizando a db14, permite identificar os coeficientes em que há maior diferença entre a situação base e de avaria. Para a avaria no anel interno, os coeficientes de níveis discretos 3, 5 e 8 apresentam maiores variações, quer no valor da energia do sinal (valores presentes na Tabela 9) quer nos sinais reconstruídos presentes na Fig. 4.25.

**TABELA 9 - ENERGIA, E RESPECTIVA VARIAÇÃO, CORRESPONDENTE AOS COEFICIENTES DO SINAL, PARA A SITUAÇÃO PRESENTE NA FIG. 4.25.**

Coeficientes	Saudável (J)	Avaria 2 mm (J)	$\Delta$ 2 mm	Avaria 4 mm (J)	$\Delta$ 4 mm
D3	$7.42 \cdot 10^{-4}$	$8.08 \cdot 10^{-2}$	10789%	$7.06 \cdot 10^{-1}$	95048%
D4	$1.52 \cdot 10^{-2}$	$1.67 \cdot 10^{-2}$	10%	$6.17 \cdot 10^{-2}$	306%
D5	$3.16 \cdot 10^{-3}$	$1.32 \cdot 10^{-1}$	4077%	$1.51 \cdot 10^{-1}$	4678%
D6	$3.95 \cdot 10^{-3}$	$3.32 \cdot 10^{-3}$	-16%	$5.55 \cdot 10^{-3}$	41%
D7	$1.76 \cdot 10^{-3}$	$6.64 \cdot 10^{-3}$	277%	$4.17 \cdot 10^{-4}$	-76%
D8	$4.79 \cdot 10^{-5}$	$1.56 \cdot 10^{-3}$	3157%	$1.82 \cdot 10^{-3}$	3700%
A8	$1.61 \cdot 10^{-2}$	$1.35 \cdot 10^{-4}$	-99%	$1.06 \cdot 10^{-4}$	-99%



**Fig. 4.25 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes na direção do eixo x, utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio: (a) usando um rolamento saudável, (b) usando um rolamento com furo de 2 mm no anel interno.**

### 4.3. Análise dos sinais elétricos

#### 4.3.1. Avaria no anel externo

No que respeita aos sinais elétricos analisados, foram aplicadas as técnicas de processamento a sinais referentes à corrente de alimentação do motor, assim como às potências ativa e reativa instantâneas do mesmo.

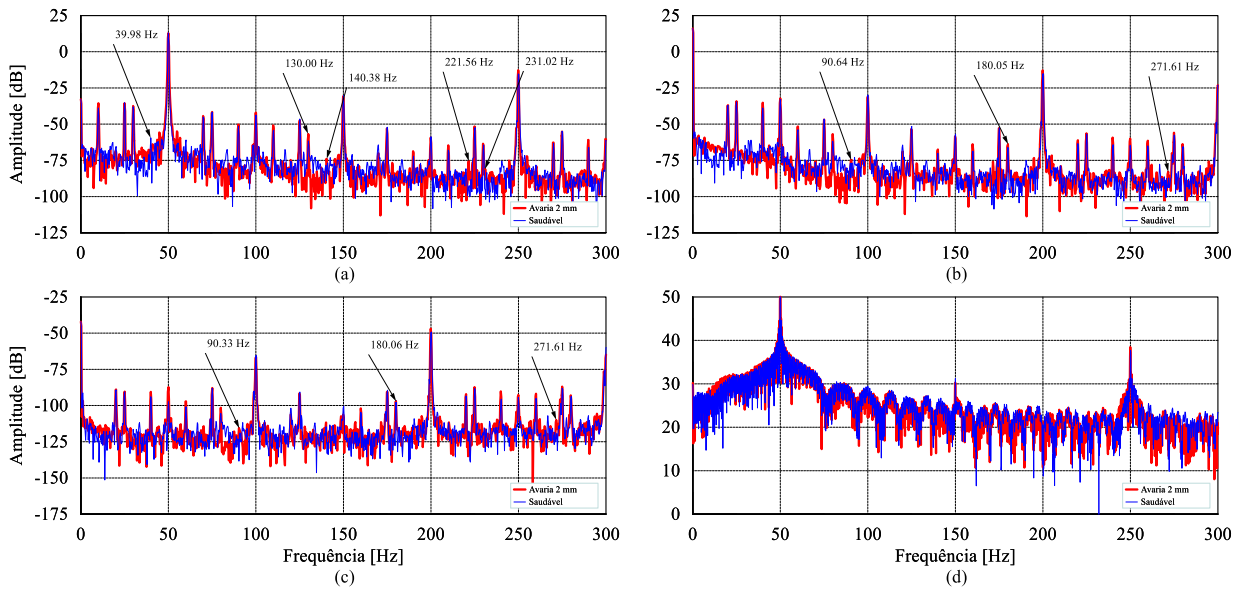


Fig. 4.26 - Espectros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.

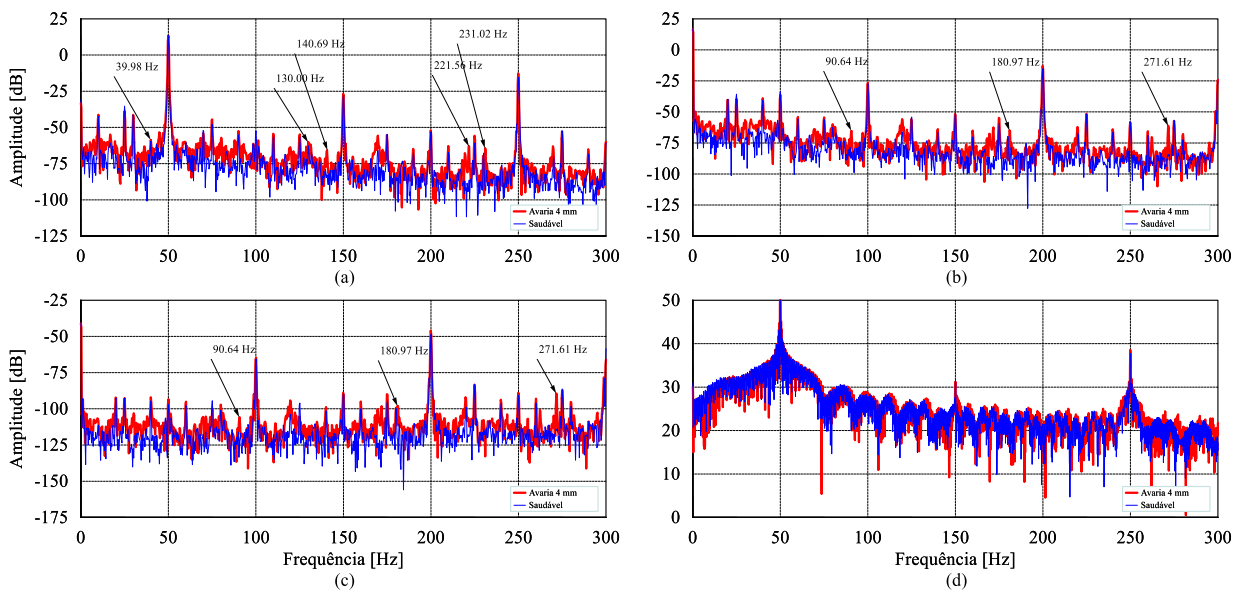


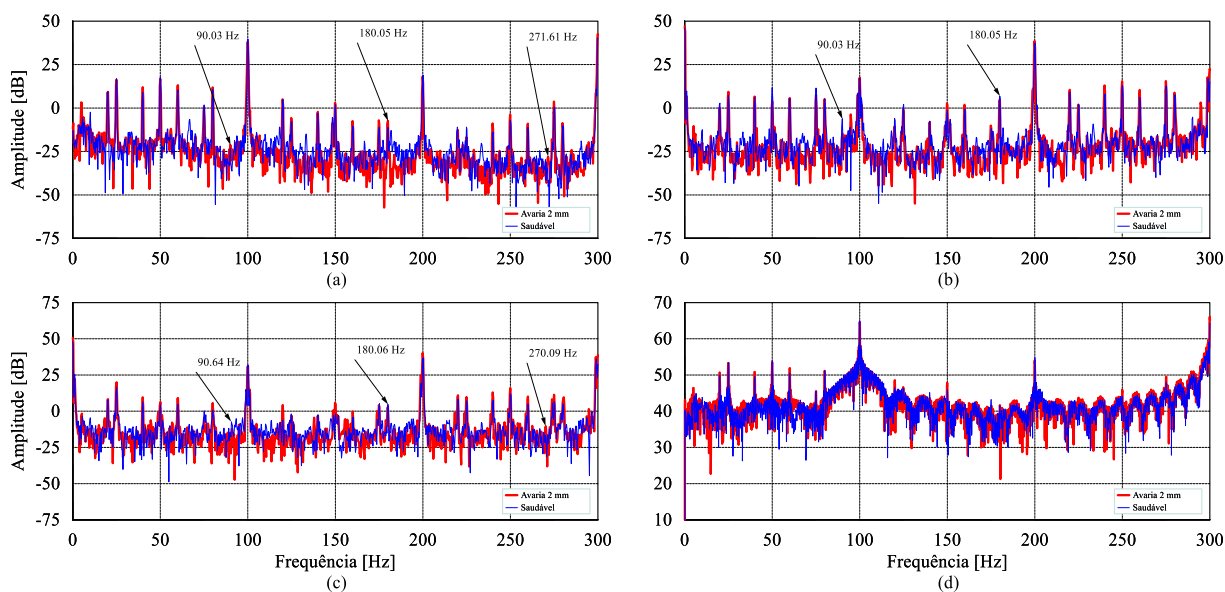
Fig. 4.27 - Espectros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.



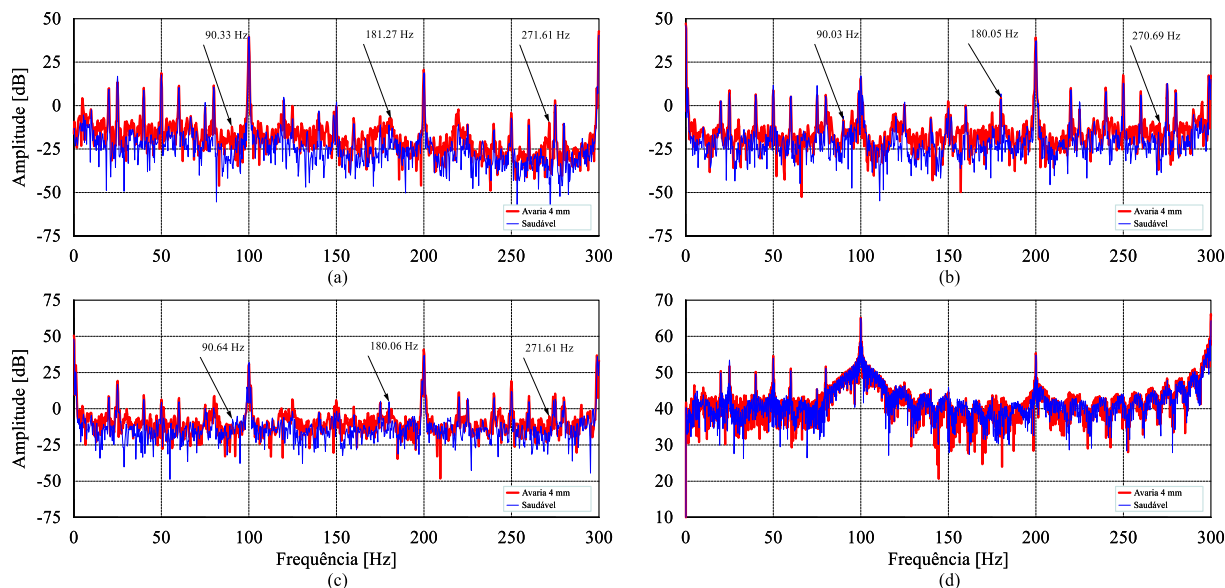
As Fig. 4.26 e Fig. 4.27 apresentam espectros relativos à corrente de alimentação para os dois níveis de severidade da avaria com o motor a funcionar em vazio. As regiões do espectro passíveis de análise nos sinais elétricos são aquelas onde a frequência é mais baixa, devido à natureza indutiva do motor. A MCSA possibilita a visualização de algumas componentes espectrais relacionadas com a avaria no anel externo de um rolamento, sendo a FFT a técnica que permite uma melhor identificação das componentes espectrais. No entanto, quando a avaria se encontra num estado incipiente, torna-se difícil a identificação com clareza da presença da mesma, devido à semelhança do sinal com o registado sem a avaria. A aplicação da TH e do TKEO também permite a identificação de algumas componentes, essencialmente quando a avaria se encontra no estado mais avançado. Aplicando a CZT não é possível a identificação de qualquer componente espectral associada à avaria.

Ao invés do regime de carga ilustrado nas figuras, quando o motor funciona a níveis superiores de carga, torna-se mais complicada a identificação das componentes associadas à avaria, podendo ser visualizados alguns exemplos de espectros dos sinais elétricos obtidos à meia carga no APÊNDICE A.

Para os sinais de potência, cujas frequências características são semelhantes às identificadas nos sinais de vibração, são apresentados nas Fig. 4.28 e Fig. 4.29 os espectros obtidos da aplicação das técnicas de processamento dos sinais da potência ativa e nas Fig. 4.30 e Fig. 4.31 os espectros relativos à potência reativa. Os sinais da potência ativa instantânea não permitem identificar a avaria quando esta é menos severa através da aplicação das várias técnicas no domínio da frequência. Apenas para um estado de avaria mais avançado é possível descortinar algumas componentes espectrais relativas à avaria, sendo apenas visíveis com alguma facilidade através da aplicação da FFT, Fig. 4.29(a).

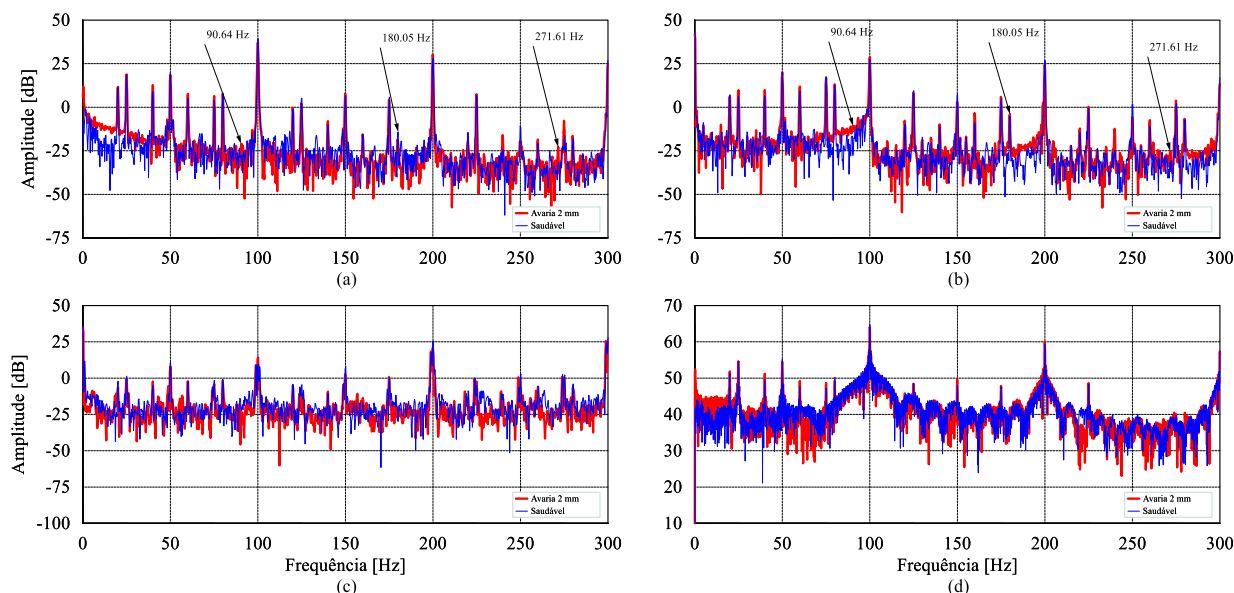


**Fig. 4.28 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**



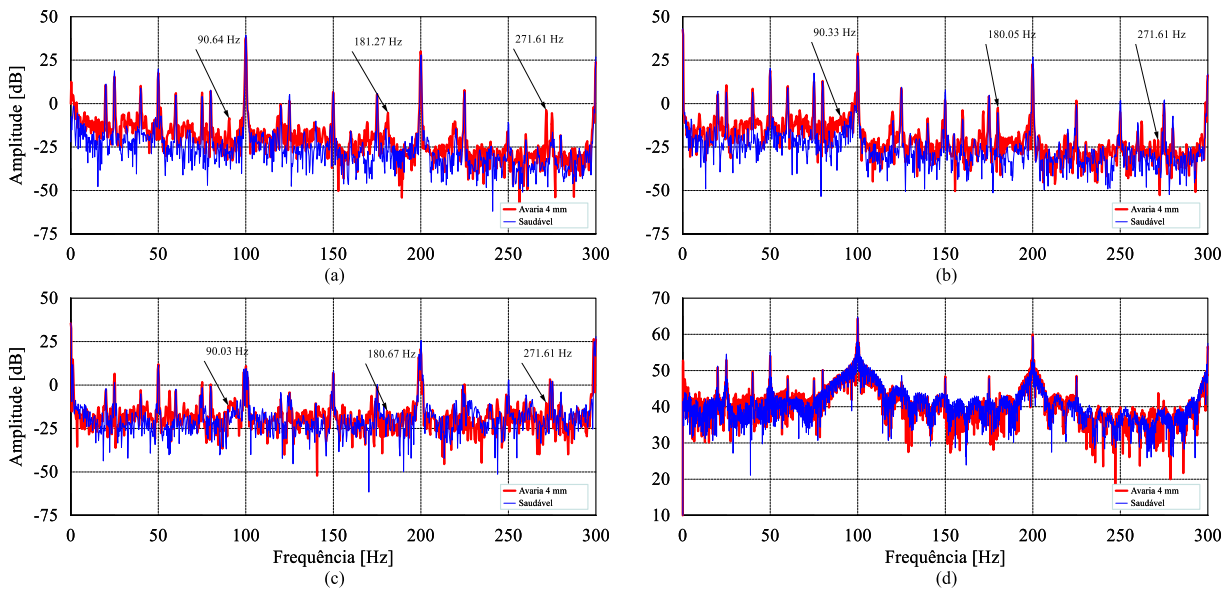
**Fig. 4.29 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

Nos sinais de potência reativa instantâneos, a visualização das componentes características da avaria melhora consideravelmente, face à potência ativa, aplicando as diversas técnicas. É possível visualizar algumas componentes espectrais relativas à aplicação da FFT e da TH quando a avaria se encontra no estado inicial (Fig. 4.30). Com a evolução da avaria regista-se o aumento da amplitude dessas componentes, claramente visíveis através da aplicação da FFT (Fig. 4.31(a)), assim como a possibilidade de identificação das componentes na aplicação da CZT e do TKEO.



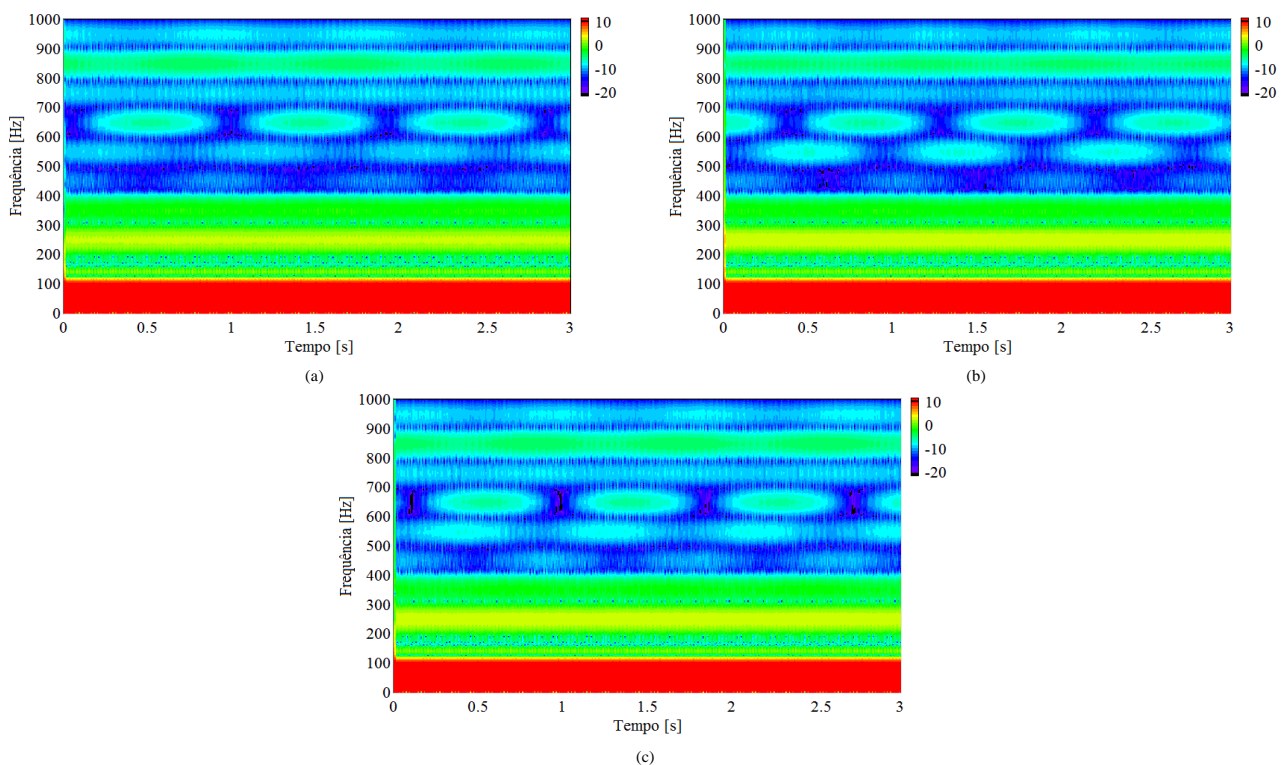
**Fig. 4.30 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**



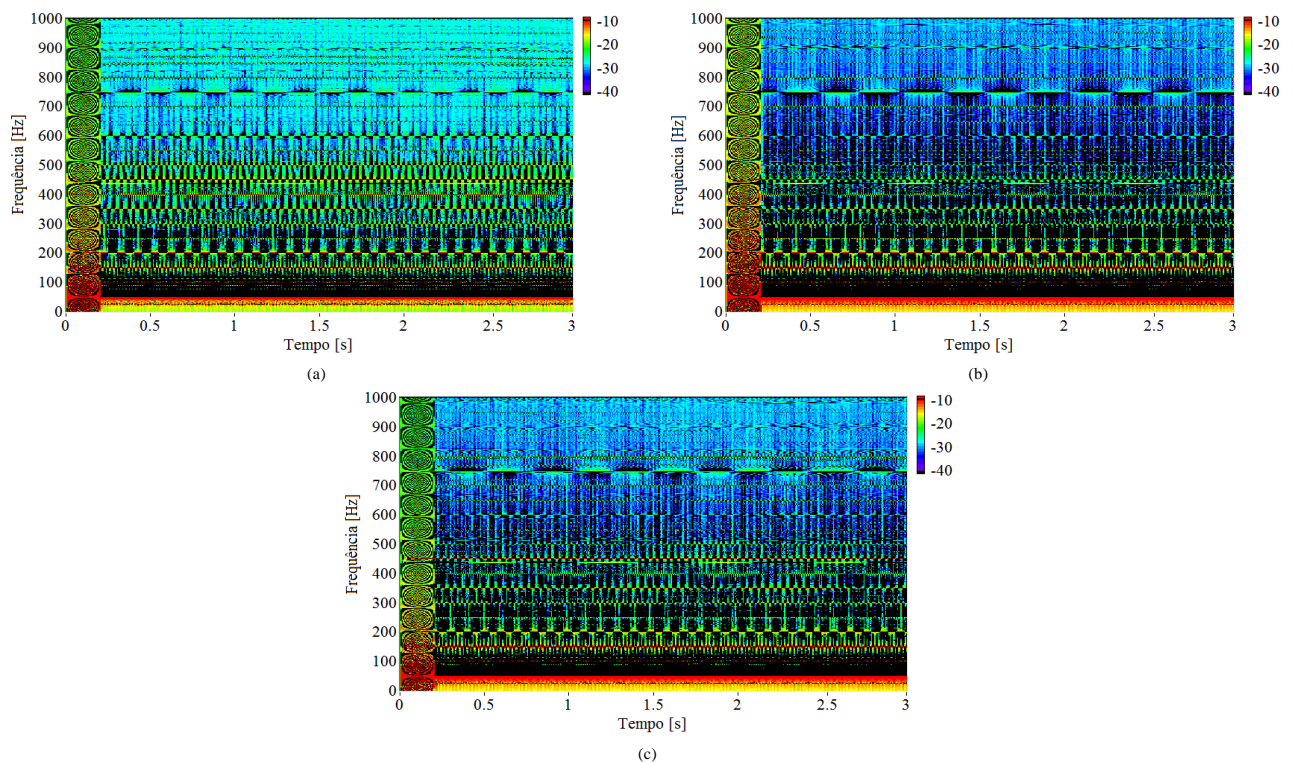


**Fig. 4.31 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

Em suma, no que respeita aos sinais elétricos analisados, é através da potência reativa instantânea que é conseguida uma melhor visualização das componentes espectrais características da avaria, seguindo-se a corrente de alimentação e a potência ativa instantânea.



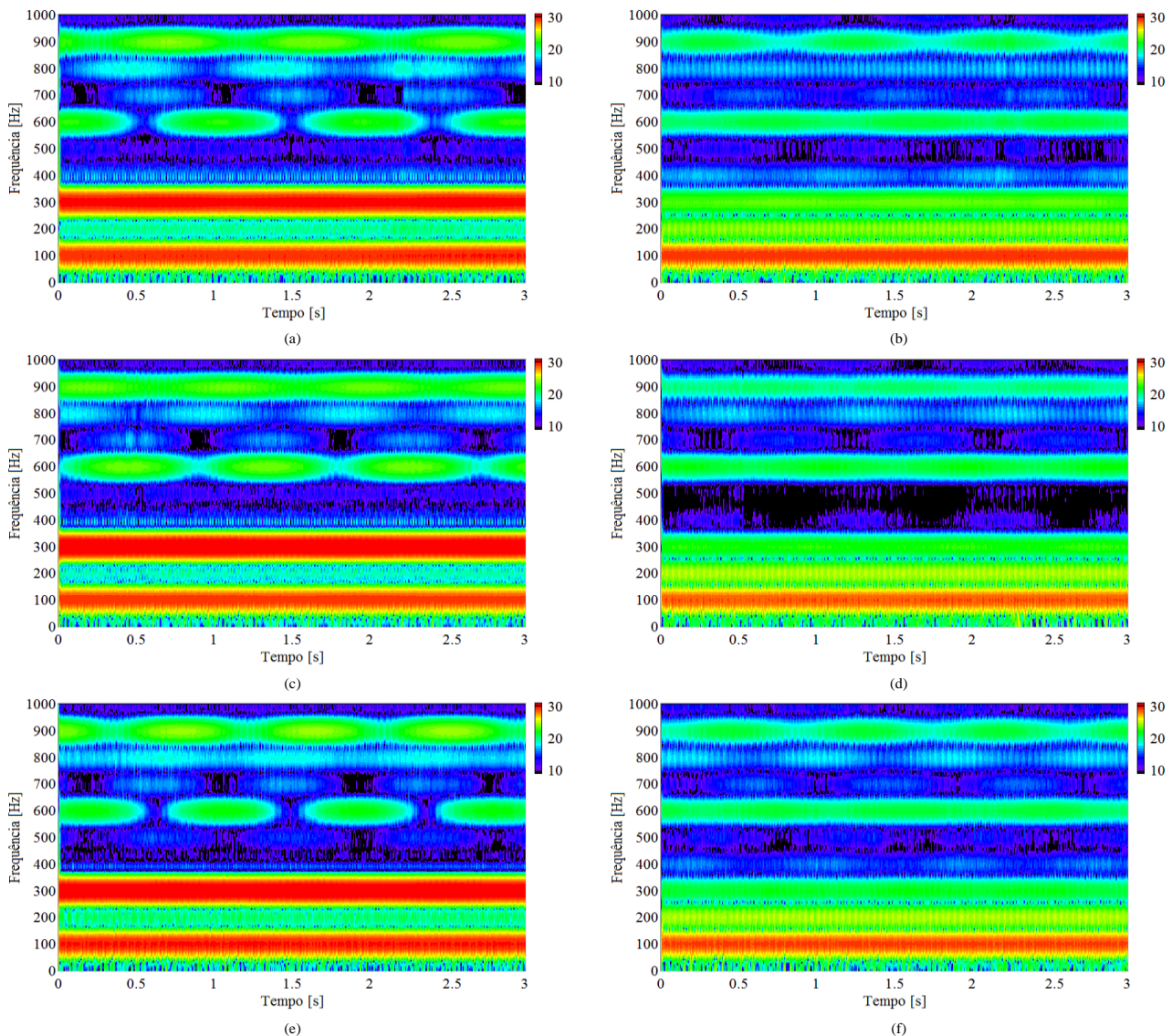
**Fig. 4.32 - Espectrogramas da corrente de alimentação representativos da evolução da avaria no anel externo do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a STFT: (a) sem avaria; (b) com avaria de 2 mm; (c) com avaria de 4 mm, com escalas em dB.**



**Fig. 4.33 - Espectrogramas da corrente de alimentação representativos da evolução da avaria no anel externo do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a WVD: (a) sem avaria; (b) com avaria de 2 mm; (c) com avaria de 4 mm, com escalas em dB.**

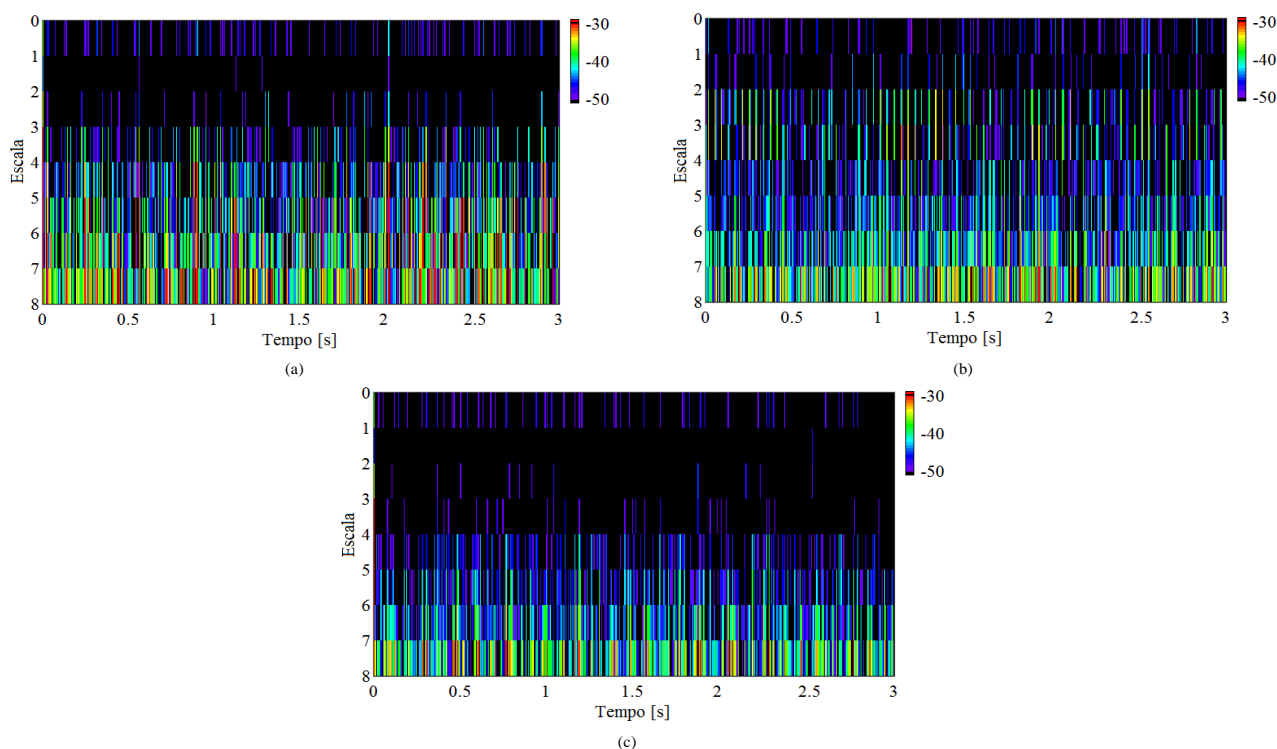
As Fig. 4.32 e Fig. 4.34 mostram a aplicação da STFT. Na Fig. 4.32, onde se encontra retratada a evolução da avaria tendo como sinal a corrente elétrica que alimenta o motor, são identificadas gamas de frequência com amplitudes semelhantes, associadas aos harmónicos presentes na rede. Embora não existindo um padrão que permita a identificação da avaria, existem diferenças, muito reduzidas, na amplitude em certos harmónicos. No entanto, estas diferenças podem estar relacionadas com as condições da rede elétrica, onde há ligeiras variações das componentes harmónicas. Nas zonas dos espectrogramas entre harmónicos, onde predominam as frequências características da avaria, não há alterações de relevo na amplitude do sinal, permitindo concluir a inadequabilidade deste tipo de técnicas aplicadas a estas condições. Os espectrogramas das potências ativa e reativa instantâneas, presentes na Fig. 4.34, não permitem a identificação da avaria, visto não haverem alterações de relevo na amplitude do sinal nas várias situações analisadas, tal como havia sido registado para a corrente elétrica.

Aplicando a WVD, mantém-se a incapacidade de identificação de um padrão ou de amplitudes discrepantes do sinal saudável em relação aos sinais adquiridos quando na presença de uma avaria, conforme pode ser visualizado na Fig. 4.33, da corrente de alimentação. Regista-se a existência de termos cruzados nos espectrogramas. A existência dos termos cruzados estende-se aos restantes sinais elétricos analisados, inviabilizando a deteção da avaria através da aplicação deste tipo de técnicas.



**Fig. 4.34 -** Espetrogramas representativos da evolução da avaria no anel externo do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a STFT: (a) sem avaria, potência ativa; (b) sem avaria, potência reativa; (c) com avaria de 2 mm, potência ativa; (d) com avaria de 2 mm, potência reativa; (e) com avaria de 4 mm, potência ativa; (f) com avaria de 4 mm, potência reativa; com escalas em dB.

A Fig. 4.35 apresenta escalogramas resultantes da aplicação da onduleta *Morlet* a sinais relativos à corrente de alimentação do motor. Além dos níveis de escala desprezados na análise dos sinais de vibração, também o 3º nível abrange uma gama de frequências irrelevante para os sinais elétricos, devido à natureza indutiva do motor. Observando a Fig. 4.35, constata-se a dificuldade em identificar escalas com amplitudes diferentes das presentes na situação base. O 4º nível de escala mostra algumas diferenças, para a situação da avaria menos severa, verificando-se um aumento da amplitude do sinal, enquanto para o nível de maior severidade da avaria se regista a diminuição da amplitude. Não há um padrão definido que permita caracterizar a avaria consoante a sua severidade. Assim como nos sinais da corrente de alimentação do motor, os sinais das potências ativa e reativa também não permitem a identificação da avaria.



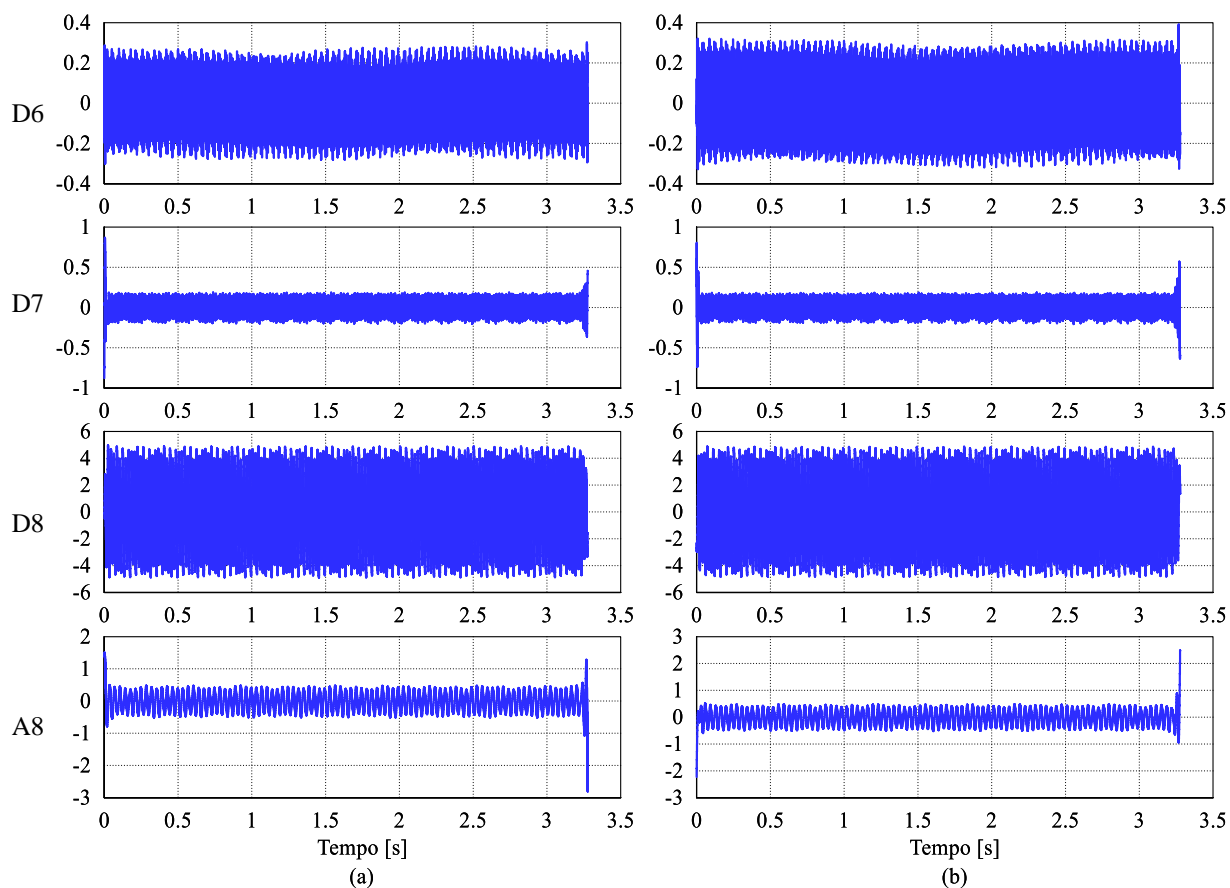
**Fig. 4.35 - Escalogramas da corrente de alimentação do motor a funcionar em vazio, representativos da evolução da avaria no anel externo do rolamento do lado do ventilador, aplicando a CWT (onduleta *Morlet*): (a) sem avaria; (b) com avaria de 2 mm; (c) com avaria de 4 mm; com escalas em dB.**

Através da decomposição do sinal, com recurso à DWT (onduleta db14), a energia do coeficiente correspondente ao nível 6 (D6) surge como a única que comporta uma variação positiva, no que à corrente diz respeito, conforme se pode verificar na Fig. 4.36 e na Tabela 10. Esta variação é maior para uma avaria de menor severidade. Nos sinais de potência ativa, os coeficientes D5 e D6 apresentam um comportamento semelhante ao obtido na corrente elétrica, para os coeficientes D6. A energia dos coeficientes dos sinais de potência reativa apresenta uma variação negativa quando presente a avaria.

**TABELA 10 - ENERGIA, E RESPECTIVA VARIAÇÃO, CORRESPONDENTE AOS COEFICIENTES DO SINAL, PARA A SITUAÇÃO PRESENTE NA FIG. 4.36.**

Coeficientes	Saudável (J)	Avaria 2 mm (J)	$\Delta$ 2 mm	Avaria 4 mm (J)	$\Delta$ 4 mm
D4	$1.31 \cdot 10^{-2}$	$1.18 \cdot 10^{-2}$	-10%	$1.04 \cdot 10^{-2}$	-21%
D5	$3.55 \cdot 10^{-2}$	$3.38 \cdot 10^{-2}$	-5%	$2.63 \cdot 10^{-2}$	-26%
D6	$5.88 \cdot 10^{-2}$	$7.58 \cdot 10^{-2}$	29%	$7.21 \cdot 10^{-2}$	23%
D7	$2.85 \cdot 10^{-3}$	$2.48 \cdot 10^{-2}$	-13%	$2.25 \cdot 10^{-2}$	-21%
D8	$2.05 \cdot 10^1$	$1.9 \cdot 10^1$	-7%	$1.74 \cdot 10^1$	-15%
A8	$2.11 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	-5%	$1.94 \cdot 10^{-1}$	-8%



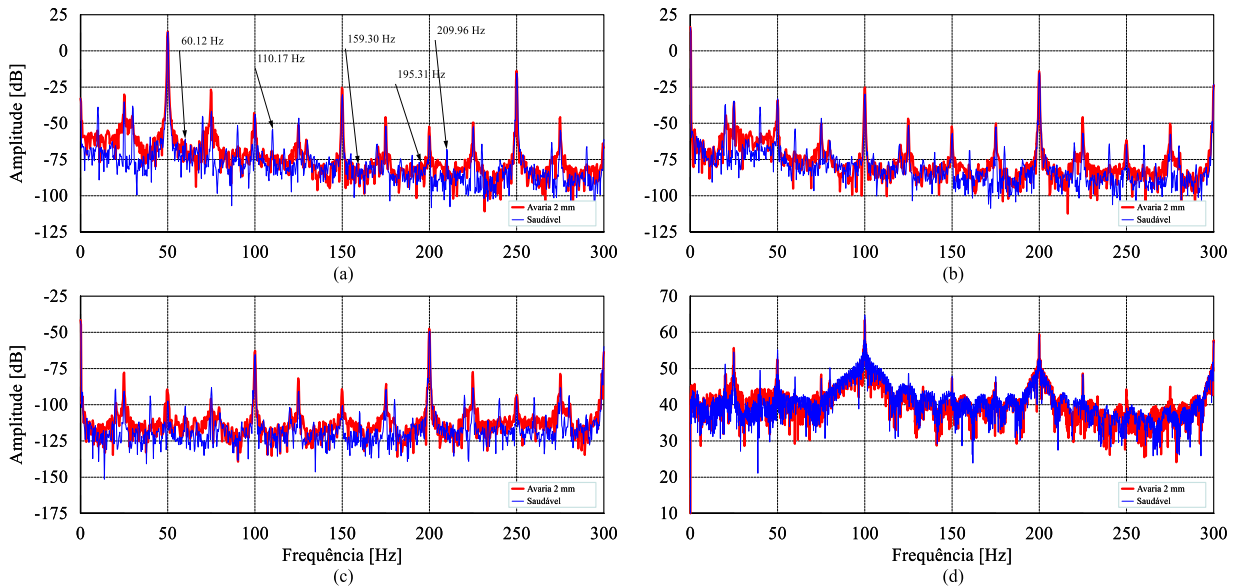


**Fig. 4.36 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes da corrente de alimentação, utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio: (a) usando um rolamento saudável; (b) usando um rolamento com furo de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador.**

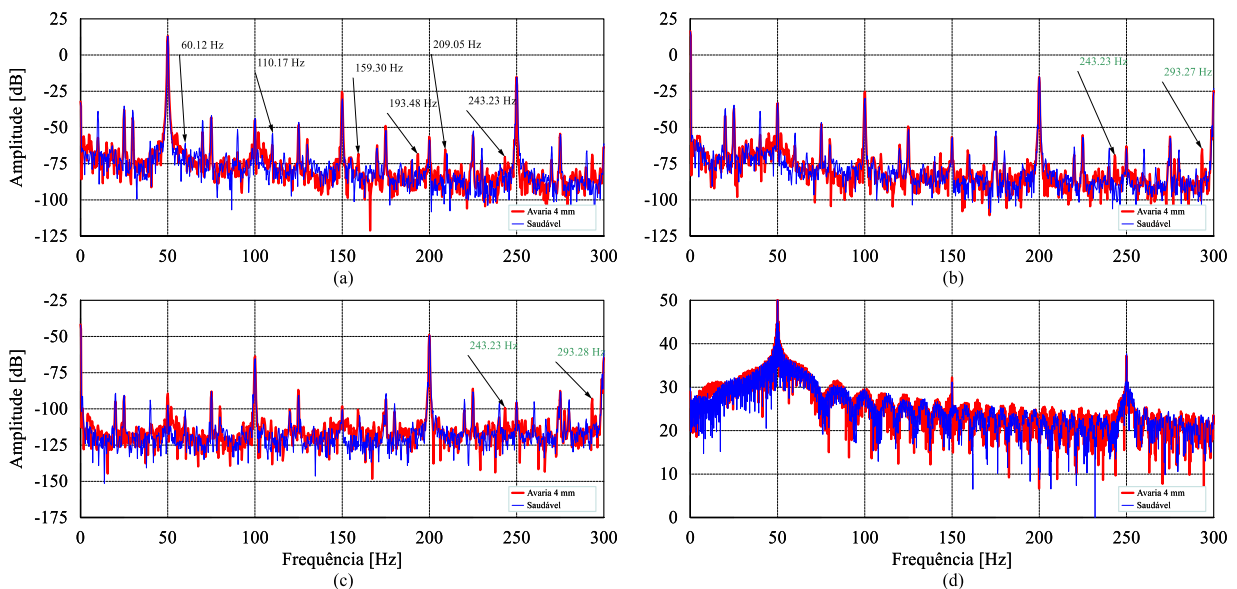
### 4.3.2. Avaria no anel interno

Para a avaria no anel interno do rolamento, as grandezas elétricas em estudo demonstram comportamentos diferentes do ponto de vista de identificação da avaria. Para os sinais relativos à corrente de alimentação do motor, cujos espectros obtidos estão presentes nas Fig. 4.37 (avaria incipiente) e Fig. 4.38 (avaria mais severa), apenas são identificáveis algumas componentes espectrais relacionadas com a avaria quando esta se encontra num estado mais severo.

Destaca-se a aplicação da FFT como a técnica que permite a melhor visualização das componentes espectrais características da avaria. Comparando com as outras técnicas em estudo, verifica-se uma maior amplitude das componentes espectrais relacionadas com avaria, sendo maior a diferença relativamente ao sinal obtido quando o motor roda com rolamentos saudáveis. A aplicação da TH e do TKEO também possibilita a identificação de algumas componentes, em menor número face às identificadas com recurso apenas à FFT. A aplicação da CZT não permite a identificação de qualquer componente espectral associada à avaria.

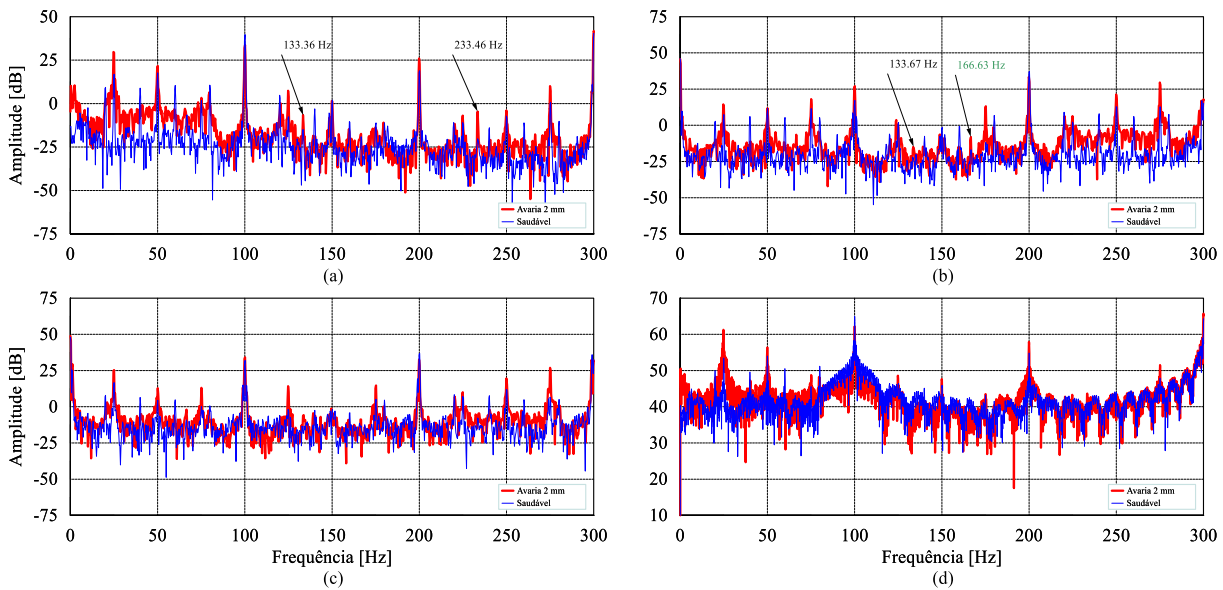


**Fig. 4.37 - Espectros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

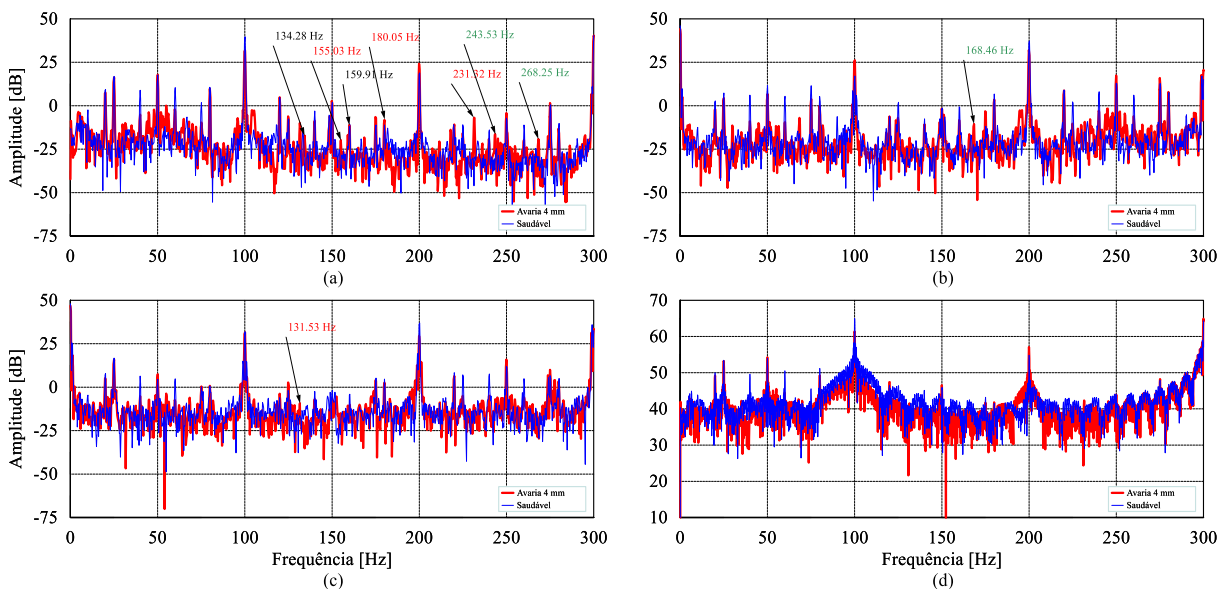


**Fig. 4.38 - Espectros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

Analisando os sinais da potência ativa instantânea, cujos espectros se apresentam nas Fig. 4.39 (avaria incipiente) e Fig. 4.40 (avaria mais severa), constata-se a presença de algumas componentes espectrais características da avaria através da aplicação da FFT quando esta se encontra no seu estado incipiente, contrastando com o visualizado nos sinais da corrente de alimentação do motor. Embora sejam apenas visíveis duas componentes nesta gama de frequências, ambas caracterizam-se pela sua elevada amplitude face à situação sem avaria.



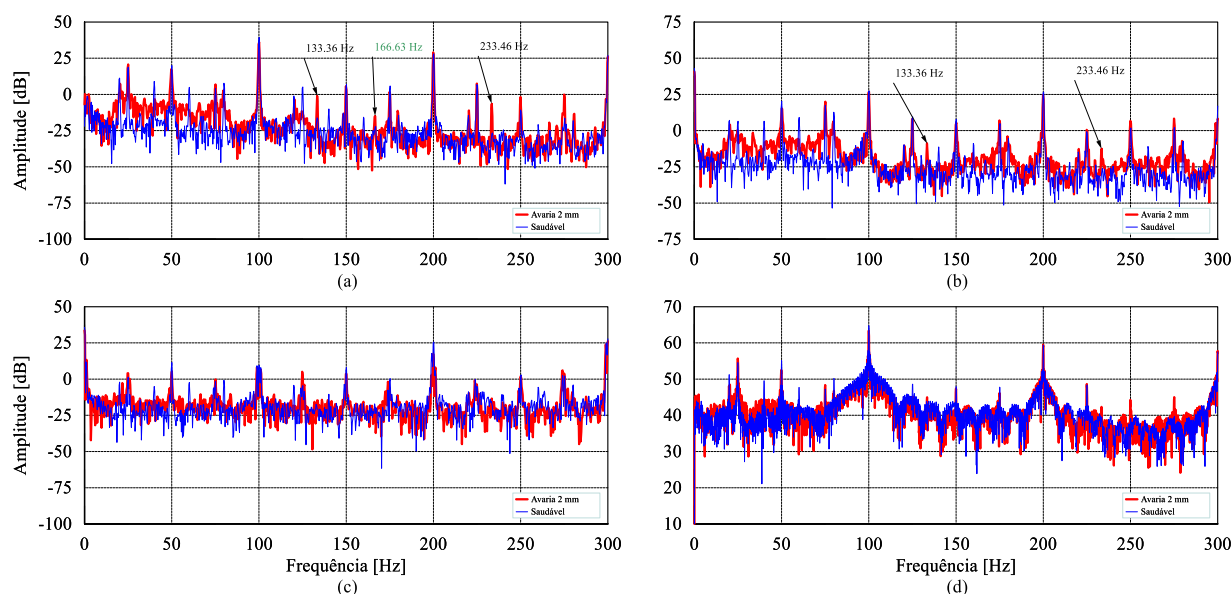
**Fig. 4.39 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**



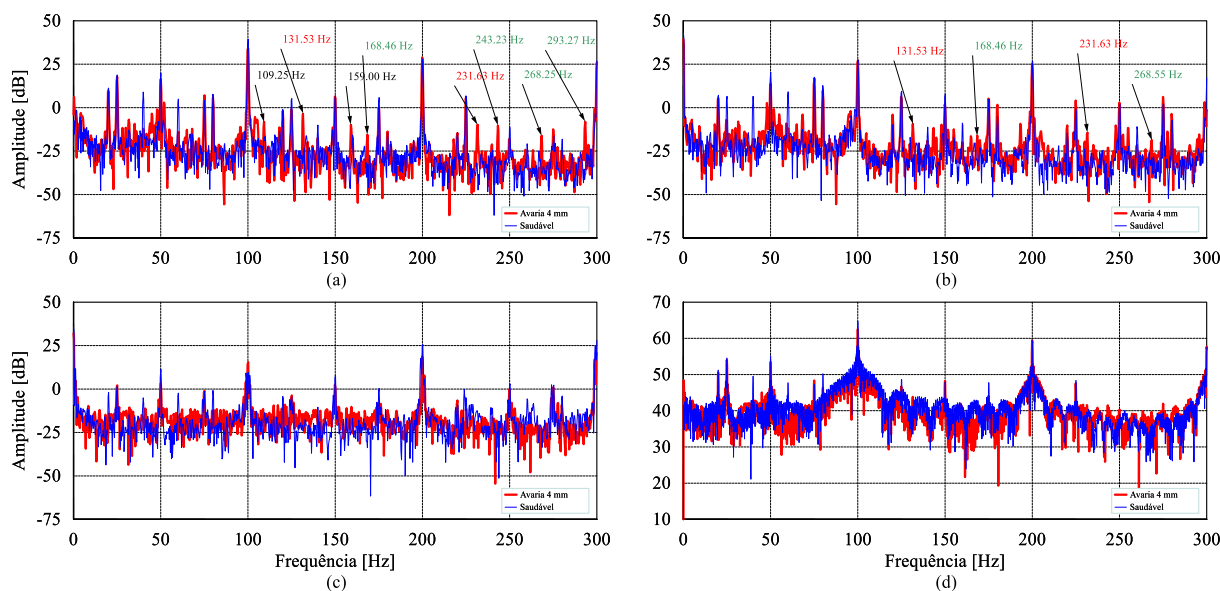
**Fig. 4.40 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

Para um estado de avaria mais avançado, identificam-se componentes espectrais determinadas através da aplicação de (4.1), estando identificadas a vermelho as obtidas quando  $k = -2$  e a verde quando  $k = 2$ , conforme se verifica na Fig. 4.40. A aplicação da FFT é a que permite a visualização do maior número de componentes espectrais relacionadas com a avaria. As aplicações da TH e do TKEO não apresentam espectros elucidativos da presença da avaria, registando-se piores visualizações nos espectros dos sinais da potência ativa comparativamente com os espectros dos sinais da corrente de alimentação.

Ainda no âmbito dos sinais de potência elétrica, os espectros dos sinais da potência reativa instantânea, presentes nas Fig. 4.41 (avaria incipiente) e Fig. 4.42 (avaria mais severa), permitem a identificação das componentes espectrais características da avaria com maior efetividade, quando comparados com os espectros obtidos referentes às grandezas elétricas anteriormente analisadas. Quando a avaria se encontra num estado incipiente, as aplicações da FFT e da TH permitem a identificação de componentes relacionadas com a avaria.



**Fig. 4.41 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**



**Fig. 4.42 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT em vazio com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

Perante a mesma avaria no estado mais avançado, tal como foi verificado nos sinais da potência ativa instantânea, surgem componentes espectrais relacionadas com as frequências obtidas em (4.1),

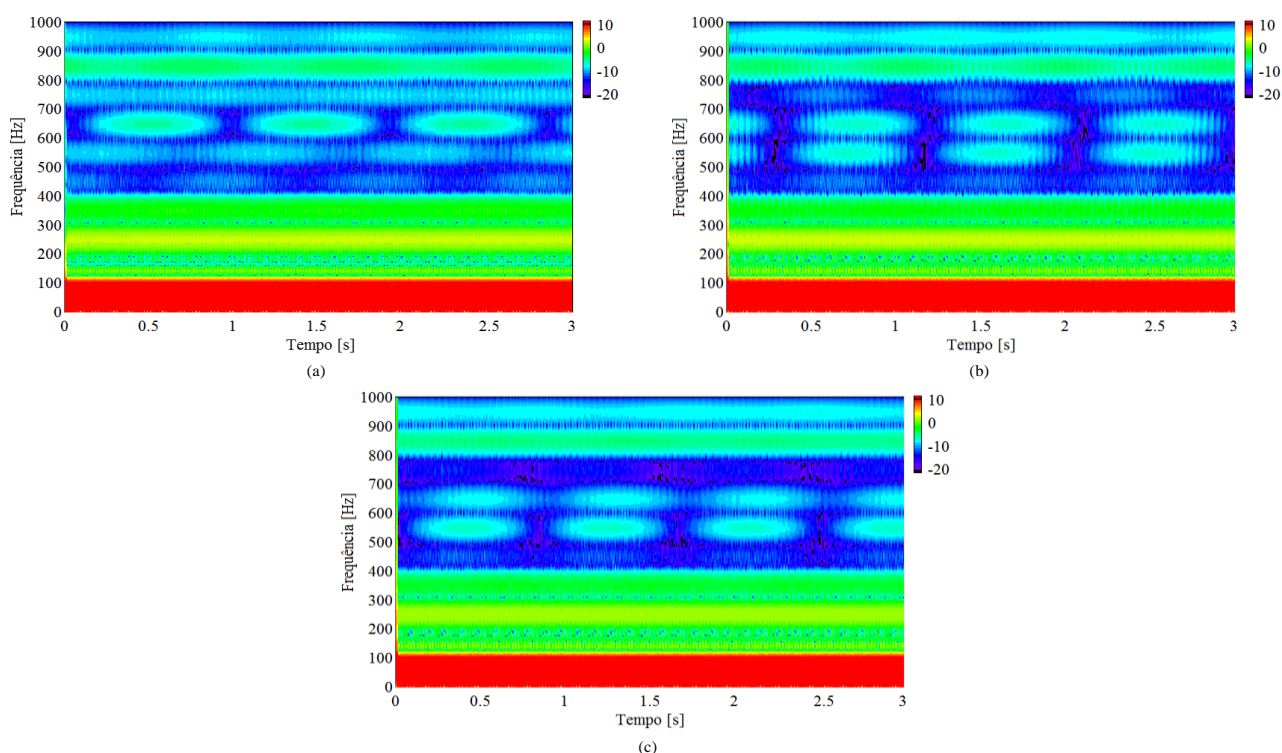


tendo estas componentes maior presença no espectro obtido apenas aplicando a FFT. Os espectros obtidos através da aplicação das restantes técnicas não possibilitam uma identificação clara das componentes, excetuando algumas componentes que são visíveis no espectro da TH, Fig. 4.42(b).

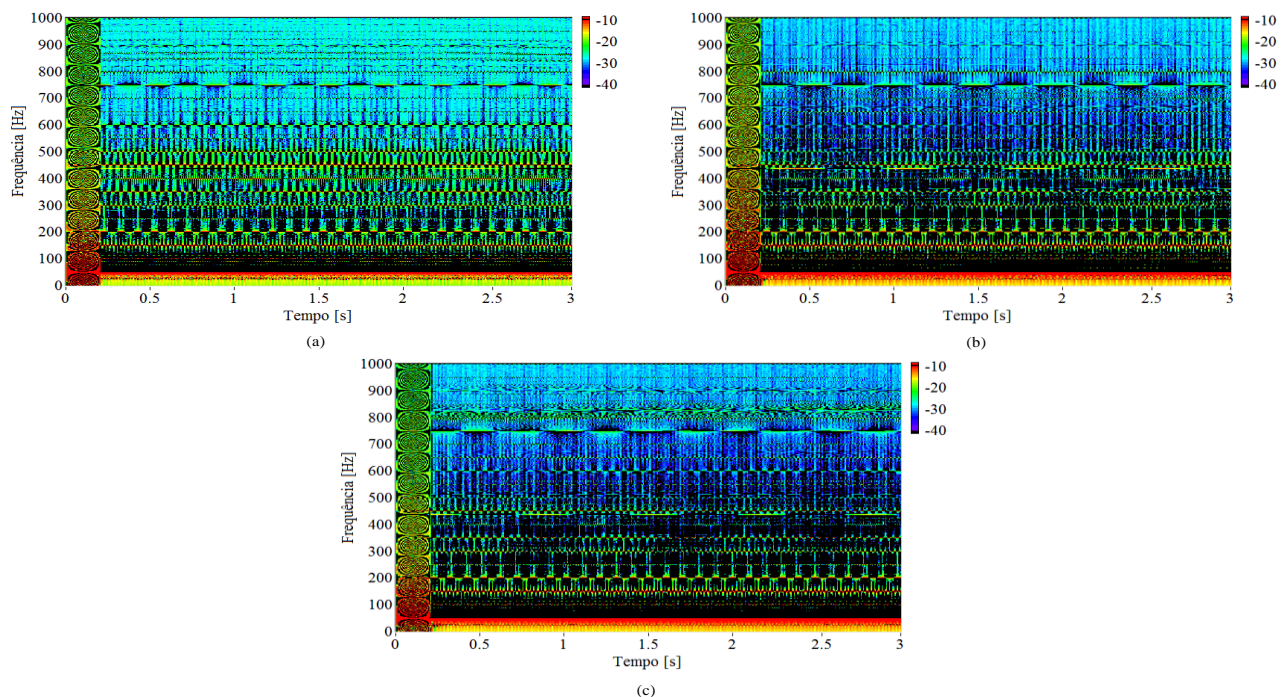
Quando o motor se encontra sob outros níveis de carga, torna-se bem mais difícil identificar componentes características da avaria. No APÊNDICE A são apresentados espectros que refletem essa conclusão.

No domínio do tempo-frequência, os espectrogramas obtidos não permitem a identificação de gamas de frequência que indiquem a presença da avaria. Os espectrogramas da corrente de alimentação do motor, presentes nas Fig. 4.43 (aplicação da STFT) e Fig. 4.44 (aplicação da WVD) não apresentam alterações significativas na amplitude do sinal que permitam distinguir a avaria do funcionamento saudável do motor, tal como foi registado no caso da avaria no anel externo.

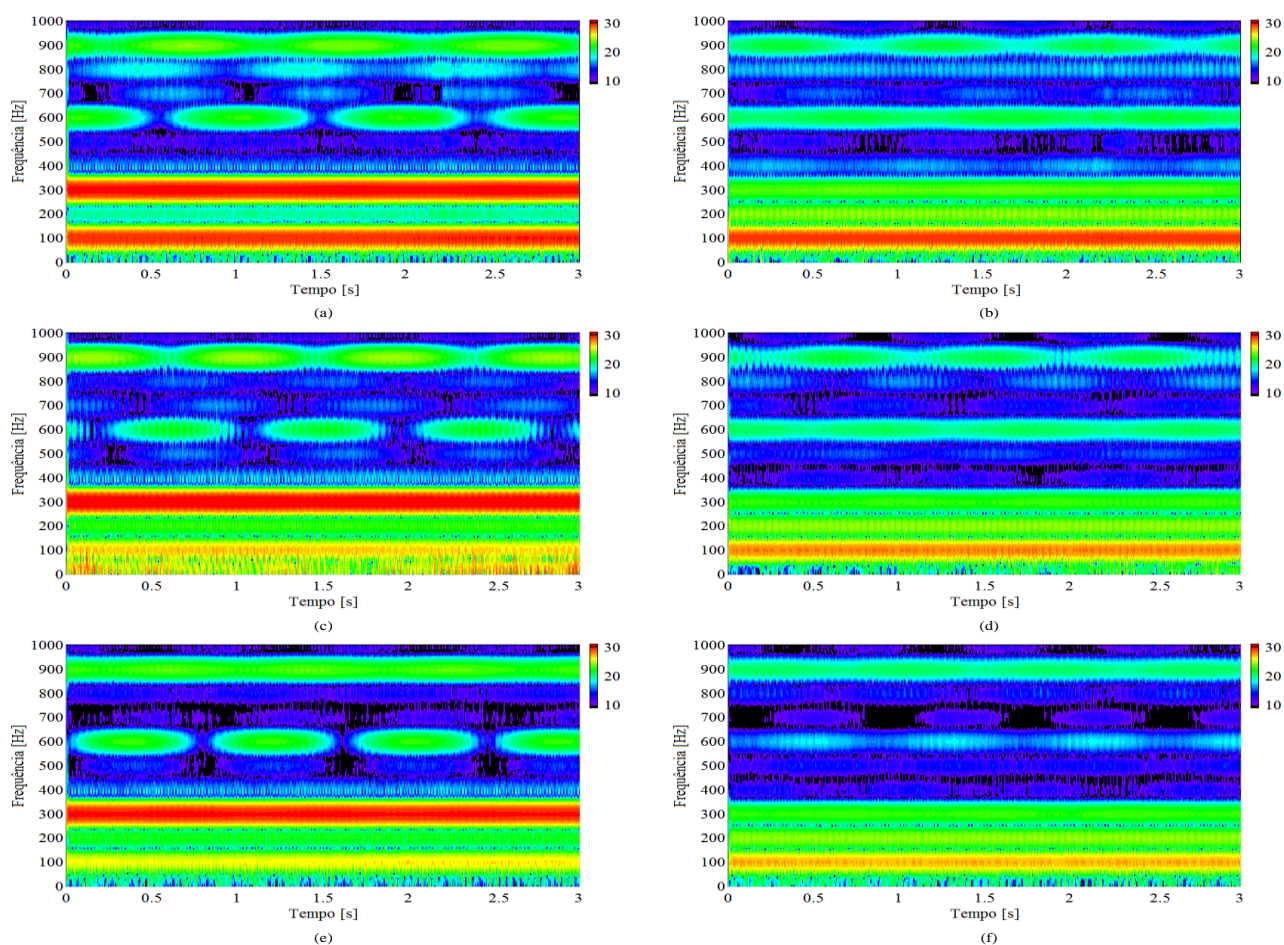
Tal como registado na avaria no anel externo dos rolamentos, os espectrogramas obtidos da aplicação da WVD a sinais elétricos desenvolve termos cruzados em grande escala, impossibilitando uma boa visualização das componentes espectrais.



**Fig. 4.43 - Espectrogramas da corrente de alimentação representativos da evolução da avaria no anel interno do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a STFT: (a) sem avaria; (b) com avaria de 2 mm; (c) com avaria de 4 mm, com escalas em dB.**

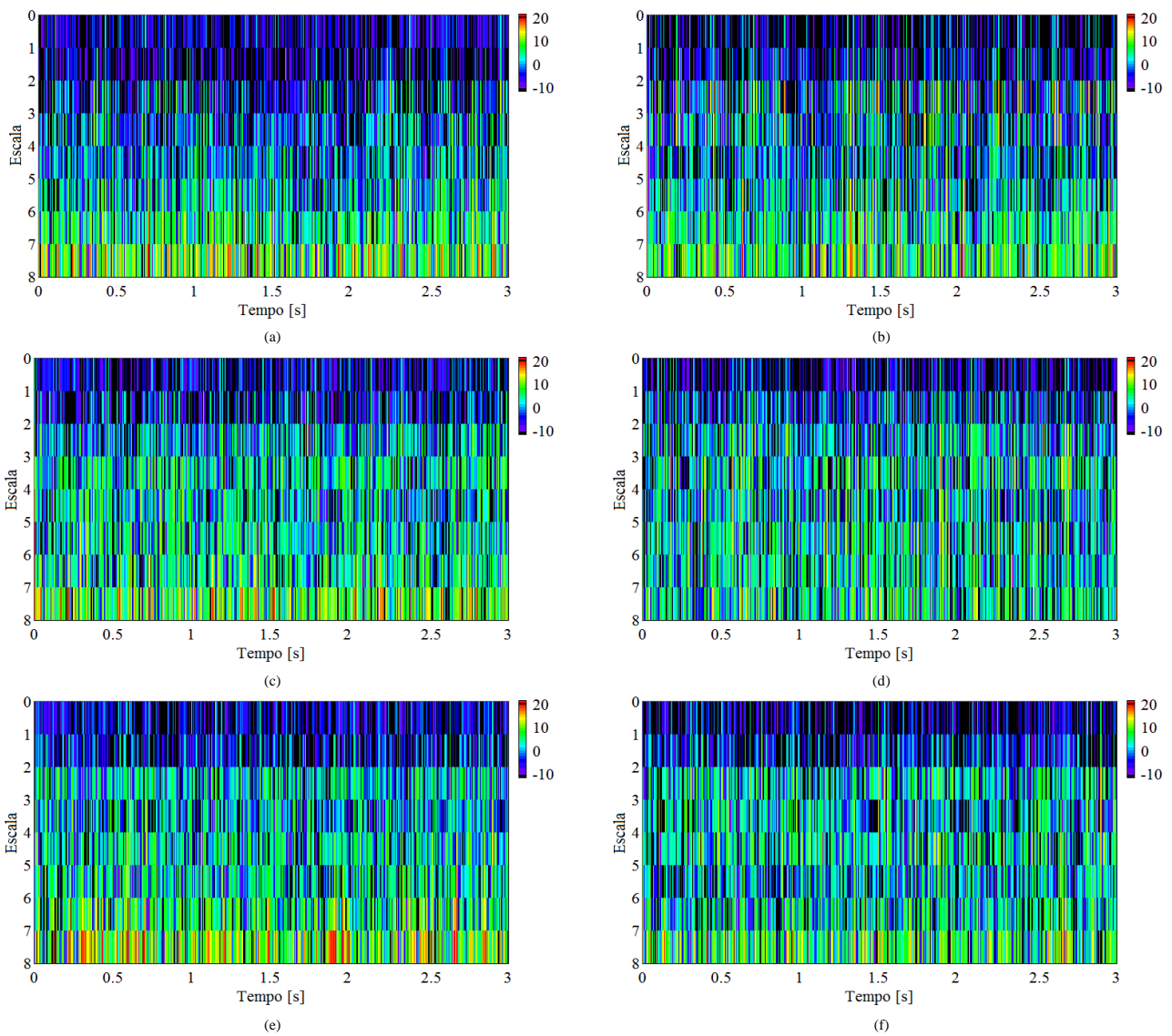


**Fig. 4.44 -** Espectrogramas da corrente de alimentação representativos da evolução da avaria no anel interno do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a WVD: (a) sem avaria; (b) com avaria de 2 mm; (c) com avaria de 4 mm, com escalas em dB.



**Fig. 4.45 -** Espectrogramas representativos da evolução da avaria no anel interno do rolamento do lado do ventilador com o motor a funcionar em vazio, aplicando a STFT: (a) sem avaria, potência ativa; (b) sem avaria, potência reativa; (c) com avaria de 2 mm, potência ativa; (d) com avaria de 2 mm, potência reativa; (e) com avaria de 4 mm, potência ativa; (f) com avaria de 4 mm, potência reativa; com escalas em dB.

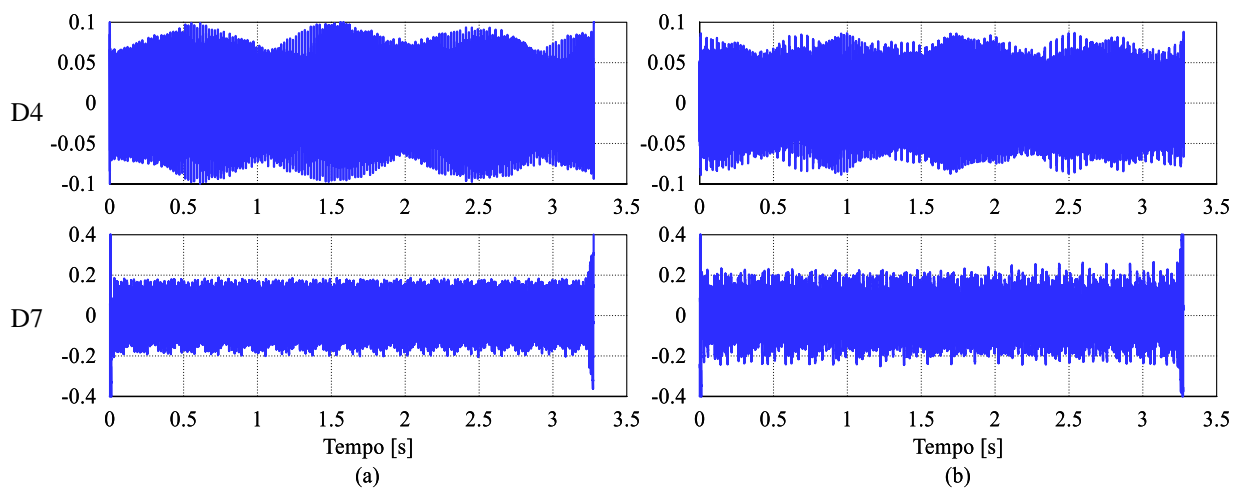
Do mesmo modo, para as potências ativa e reativa instantâneas, cujos espectrogramas se encontram na Fig. 4.45, não há variações significativas na amplitude dos sinais, tendo em consideração a severidade da avaria. Surgem em algumas regiões do espectrograma variações negativas ligeiras da amplitude dos sinais, que tendem a agravar com o aumento da severidade da avaria. Este fenómeno visualiza-se essencialmente para frequências inferiores a 150 Hz, nos sinais das duas potências, e compreendidas entre 400 Hz e 800 Hz, com maior destaque nos sinais de potência reativa.



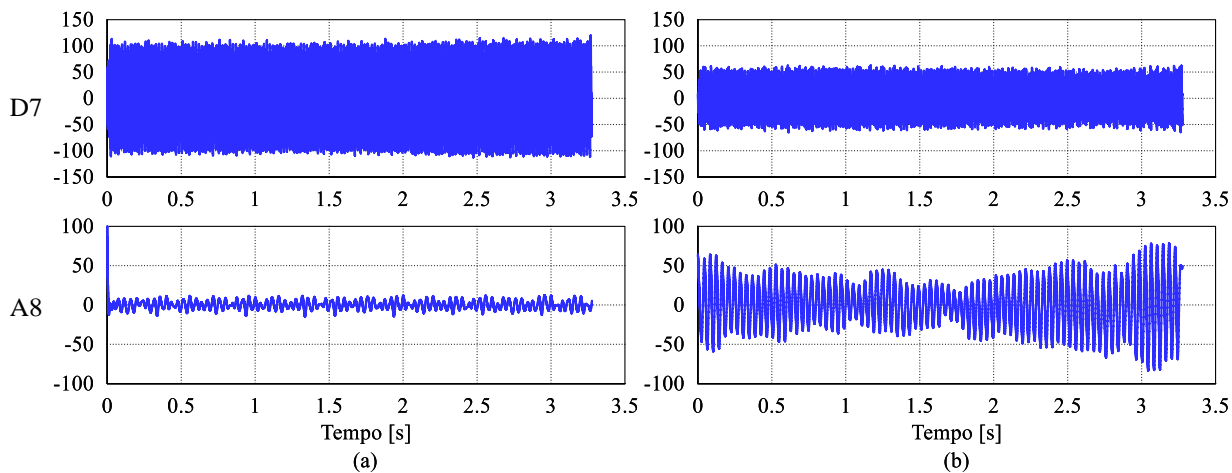
**Fig. 4.46 – Escalogramas de sinais de potência elétrica representativos da evolução da avaria no anel externo do rolamento do lado do ventilador, com o motor a funcionar em vazio, aplicando a CWT (onduleta *Morlet*): (a) sem avaria, potência ativa, (b) sem avaria, potência reativa, (c) com avaria de 2 mm, potência ativa, (d) com avaria de 2 mm, potência reativa, (e) com avaria de 4 mm, potência ativa, (f) com avaria de 4mm, potência reativa, com escalas em dB.**

Aplicando a onduleta *Morlet*, cujos escalogramas das potências ativa e reativa se encontram na Fig. 4.46, encontram-se pequenas diferenças nos escalogramas associados às avarias. No caso da potência ativa, verifica-se um ligeiro aumento da amplitude, essencialmente nos 4º e 5º níveis da escala. No entanto, a este aumento não está associado um maior grau de severidade da avaria no rolamento, não podendo ser estabelecido um elemento de referência que permita indicar a presença da avaria. Do mesmo modo, nos restantes sinais elétricos não se vislumbram alterações significativas na amplitude do sinal, quando o motor apresenta uma avaria.

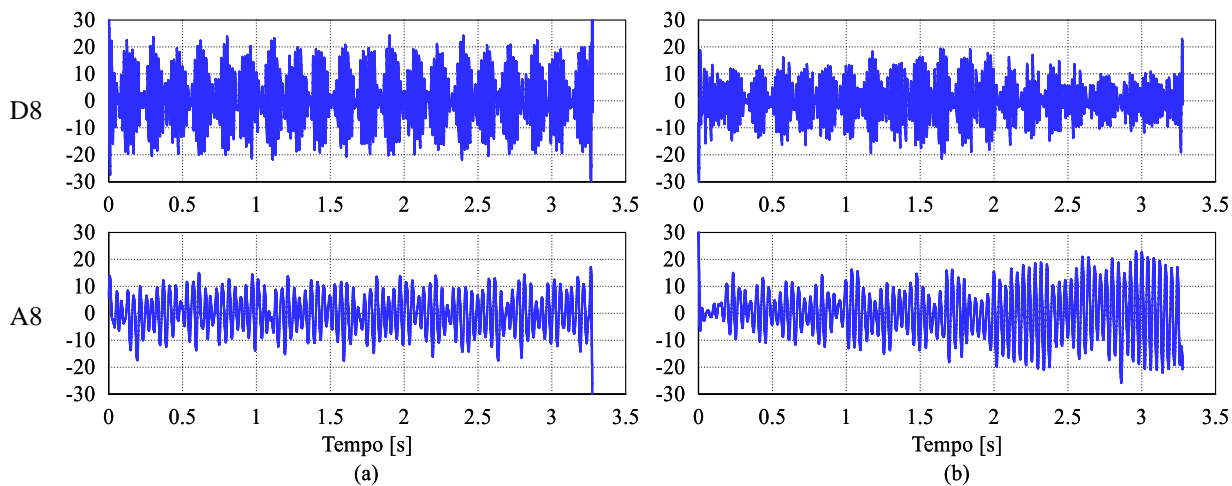
A energia do sinal reconstruído, através da aplicação da onduleta db14, não estabelece um padrão que possa ser associado a uma evolução da avaria. No entanto, alguns coeficientes dos vários sinais elétricos mostram uma evolução diferente no domínio do tempo, conforme se visualiza nas Fig. 4.47 (corrente de alimentação do motor), Fig. 4.48 (potência ativa instantânea) e Fig. 4.49 (potência reativa instantânea). Os coeficientes aqui apresentados são aqueles que registam maiores variações da energia do sinal reconstruído, sendo visíveis variações consideráveis da amplitude dos sinais dos coeficientes dos níveis de aproximação dos sinais das potências no domínio do tempo.



**Fig. 4.47 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes da corrente, utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio usando: (a) um rolamento saudável, (b) um rolamento com furo de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador.**



**Fig. 4.48 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes da potência ativa, utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio usando: (a) um rolamento saudável, (b) um rolamento com furo de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador.**



**Fig. 4.49 - Reconstrução dos sinais dos coeficientes da potência reativa, utilizando a onduleta db14, recolhidos com o motor a funcionar em vazio usando: (a) um rolamento saudável, (b) um rolamento com furo de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador.**



## 5. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

---

### 5.1. Conclusão

O trabalho aqui apresentado incidiu sobre a aplicação de técnicas avançadas de processamento de sinal no diagnóstico de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos. As técnicas utilizadas distinguem-se pelas suas especificidades, podendo ser caracterizadas pelo domínio a que estão associadas. Por conseguinte, esta dissertação transcreve a análise da aplicação das técnicas no domínio da frequência (FFT, TH, TKEO e CZT) e no domínio do tempo-frequência (STFT, WVD e a transformada de onduleta).

Com vista à deteção das avarias mecânicas introduzidas nos rolamentos do motor (avarias nos anéis externo e interno dos rolamentos), foram analisados os sinais de vibração da carcaça do motor (nas direções radial, tangencial e axial) e alguns sinais elétricos, designadamente a corrente de alimentação, a potência ativa instantânea e a potência reativa instantânea absorvidas.

No que respeita ao estudo dos sinais de vibração da carcaça do motor, verificou-se que as avarias introduzidas nos anéis dos rolamentos se manifestam com maior intensidade segundo as direções radial e tangencial do motor. No entanto, a avaria no anel externo manifesta-se com maior intensidade na direção radial do motor – eixo  $z$  do acelerómetro utilizado – ao contrário da avaria no anel interno que se manifesta com maior intensidade segundo a direção tangencial do motor – eixo  $x$  do acelerómetro.

Os espectrogramas resultantes da aplicação da STFT e da WVD aos sinais de vibração mostram gamas de frequência onde se regista uma maior amplitude das componentes espectrais. Conclui-se que a avaria no anel externo dos rolamentos regista uma maior amplitude das componentes espectrais nas gamas de frequência compreendidas entre os 400 Hz e 1200 Hz e os 2300 Hz e 3000 Hz. Quando a avaria se localiza no anel interno, as componentes espectrais com maior amplitude localizam-se nas gamas de frequência compreendidas entre os 1250 Hz e os 1750 Hz e em redor dos 500 Hz (quando o motor funciona em vazio), e entre os 2500 Hz e 3000 Hz (quando o motor funciona à meia carga).

Além das gamas de frequência enunciadas, os espectrogramas obtidos com recurso à WVD apresentam outras gamas de frequência cujas componentes espectrais apresentam maior amplitude. A existência destas amplitudes anormais advém da interferência dos termos cruzados característicos da aplicação desta técnica. Por conseguinte, conclui-se que a STFT é uma técnica mais fiável que a WVD na deteção de avarias em rolamentos.

Os resultados da aplicação da transformada de onduleta aos sinais de vibração da carcaça do motor permitem detetar a presença da avaria no rolamento, não sendo possível discriminar a sua localização, devido à semelhança dos escalogramas obtidos para as avarias nos rolamentos.

Contudo, apenas através da aplicação de técnicas no domínio da frequência é que se torna possível identificar com um maior grau de certeza a avaria no rolamento recorrendo aos sinais de vibração. Neste ponto, a aplicação do TKEO surge como a melhor técnica implementada, não só devido à maior facilidade de identificação das componentes espectrais associadas à manifestação da avaria, como também devido à maior amplitude média do espectro do sinal obtido na presença de uma avaria nos rolamentos, comparativamente com as restantes técnicas implementadas. Este aspeto é mais evidente quando a avaria se localiza no anel interno do rolamento, onde a aplicação simples da FFT, ou da CZT (cujos resultados se assemelham aos obtidos com recurso à FFT, diferenciando-se a sua maior resolução), não permite a identificação clara das componentes espectrais características da avaria.

A influência do regime de carga na aplicação das técnicas aos sinais de vibração apenas é observável na aplicação da TH. Através da aplicação desta transformada, a identificação das componentes espectrais características das avarias nos anéis externo e interno dos rolamentos é mais difícil para maiores níveis de carga.

Através da análise aos espectros dos sinais de vibração, foram identificadas novas componentes espectrais características da avaria no anel interno dos rolamentos. A existência destas componentes permite detetar a avaria pela forma como o espectro do sinal de vibração se apresenta.

No que concerne à análise dos sinais elétricos, a identificação das avarias nos rolamentos não é tão clara como a registada na análise dos sinais de vibração. A aplicação das técnicas no domínio do tempo-frequência aos sinais elétricos analisados não permitem a deteção da avaria.

Apenas através da aplicação de técnicas no domínio da frequência é possível realizar a identificação de algumas componentes espectrais características da avaria, sendo a aplicação da FFT a técnica que apresenta melhores resultados.

A uma melhor identificação da avaria, recorrendo a sinais elétricos, comprovou-se estar intimamente ligado o regime de carga sob o qual o motor se encontra em funcionamento, a localização da avaria no rolamento e o tipo de sinal elétrico analisado. Consequentemente, apenas foi possível identificar avarias nos rolamentos quando o motor funcionava em vazio, distinguindo-se uma melhor identificação da avaria consoante o tipo de sinal elétrico processado.

Uma avaria no anel externo dos rolamentos é identificada com maior facilidade recorrendo a sinais da corrente de alimentação do que a sinais da potência ativa instantânea do motor, ao contrário do

registado para a avaria no anel interno. No entanto, são os sinais da potência reativa instantânea que permitem uma identificação mais fácil da avaria nos rolamentos, ressaltando a dificuldade da detecção da avaria quando esta se encontra no estado incipiente.

Tanto nos sinais elétricos (nos casos onde são visíveis as componentes características da avaria) como nos sinais de vibração, ao aumento da severidade da avaria está normalmente associado o aumento da amplitude das componentes características da avaria.

No âmbito desta dissertação foi realizada uma publicação de nome *“Diagnosis of Bearing Faults in Induction Motors By Vibration Signals – Comparison of Multiple Signal Processing Approaches”*, apresentada no *24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2015)*, no dia 4 de Junho de 2015, em Búzios, Rio de Janeiro, Brasil.

## **5.2. Trabalho futuro**

Com vista a complementar a matéria sobre a qual esta dissertação se versou, sugere-se como trabalho a ser desenvolvido a criação de um sistema de diagnóstico de avarias em motores de indução híbrido, que aglomere o processamento de sinais de vibração da carcaça do motor e de sinais elétricos.

Além das avarias mecânicas abordadas nesta dissertação, poderiam ser utilizadas este tipo de técnicas no diagnóstico de avarias elétricas, das quais se destacam as avarias nos enrolamentos estatóricos e nas barras rotóricas.

A aplicação deste tipo de técnicas no diagnóstico de avarias a outros tipos de motor, nomeadamente aqueles que têm tido uma maior expansão ao nível da sua utilização, como por exemplo o motor de relutância, o motor de ímanes permanentes.





- [1] 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, 2005.
- [2] Z. Pinjia, D. Yi, T. G. Habetler, and L. Bin, "A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, pp. 34-46, 2011.
- [3] H. A. Toliyat, Nandi, S., Choi, S. and Meshgin-Kelk, H., *Electric machines modeling, condition monitoring and fault diagnosis*. Boca Raton, FL, USA, Taylor & Francis, 2012.
- [4] D. J. T. Siyambalapitiya and P. G. McLaren, "Reliability improvement and economic benefits of online monitoring systems for large induction machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, pp. 1018-1025, 1990.
- [5] D. Basak, A. Tiwari, and S. P. Das, "Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - a review", in *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Mumbai, India, 2006, pp. 3061-3066.
- [6] J. W. Cooley and J. W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", *Mathematics of computation*, vol. 19, pp. 297-301, 1965.
- [7] Z. K. Peng, P. W. Tse, and F. L. Chu, "A comparison study of improved Hilbert–Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 19, pp. 974-988, Sep 2005.
- [8] A. H. Nuttall, "On the quadrature approximation to the Hilbert transform of modulated signals", *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, pp. 1458-1459, 1966.
- [9] M. Blodt, J. Faucher, B. Dagues, and M. Chabert, "Mechanical load fault detection in induction motors by stator current time-frequency analysis", in *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, San Antonio, TX, USA, 2005, pp. 1881-1888.
- [10] L. Zhenxing, Z. Xiaolong, Y. Xianggen, and Z. Zhe, "Rotor cage fault diagnosis in induction motors based on spectral analysis of current Hilbert modulus", in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Denver, CO, USA, 2004, pp. 1500-1503.
- [11] R. Puche-Panadero, M. Pineda-Sanchez, M. Riera-Guasp, J. Roger-Folch, E. Hurtado-Perez, and J. Perez-Cruz, "Improved resolution of the MCSA method via hilbert transform, enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, pp. 52-59, 2009.

- [12] P. Konar and P. Chattopadhyay, "Multi-class fault diagnosis of induction motor using Hilbert and Wavelet Transform", *Applied Soft Computing*, vol. 30, pp. 341-352, May 2015.
- [13] L. Rabiner, R. W. Schafer, and C. M. Rader, "The chirp z-transform algorithm", *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 17, pp. 86-92, 1969.
- [14] M. A. Shuohan, M. A. Qishuang, and L. Xinbo, "Applications of chirp z transform and multiple modulation zoom spectrum to pulse phase thermography inspection", *NDT & E International*, vol. 54, pp. 1-8, Mar 2013.
- [15] J. Kaffanke, T. Dierkes, S. Romanzetti, M. Halse, J. Rioux, M. O. Leach, *et al.*, "Application of the chirp z-transform to MRI data", *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 178, pp. 121-128, Jan 2006.
- [16] D. Granados-Lieberman, R. J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, R. A. Osornio-Rios, and L. A. Franco-Gasca, "A real-time smart sensor for high-resolution frequency estimation in power systems", *Sensors*, vol. 9, pp. 7412-7429, Sep 2009.
- [17] M. Aiello, A. Cataliotti, and S. Nuccio, "An induction motor speed measurement based on current harmonic analysis with Chirp-Z Transform", in *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Budapest, Hungary, 2001, pp. 578-582.
- [18] H. Teager, "Some observations on oral air flow during phonation", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 28, pp. 599-601, 1980.
- [19] P. Maragos, J. F. Kaiser, and T. F. Quatieri, "On amplitude and frequency demodulation using energy operators", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, pp. 1532-1550, 1993.
- [20] A. O. Boudraa, S. Benramdane, J. C. Cexus, and T. Chonavel, "Some useful properties of cross-energy operator", *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 63, pp. 728-735, Sep 2009.
- [21] P. Henríquez Rodríguez, J. B. Alonso, M. A. Ferrer, and C. M. Travieso, "Application of the Teager–Kaiser energy operator in bearing fault diagnosis", *ISA Transactions*, vol. 52, pp. 278-284, Mar 2013.
- [22] M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, M. Riera-Guasp, J. Perez-Cruz, J. Roger-Folch, J. Pons-Llinares, *et al.*, "Application of the Teager-Kaiser energy operator to the fault diagnosis of induction motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, pp. 1036-1044, 2013.
- [23] W. Huaqing and C. Peng, "Fuzzy diagnosis method for rotating machinery in variable rotating speed", *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, pp. 23-34, 2011.

- [24] J. Rosero, J. Cusido, A. G. Espinosa, J. A. Ortega, and L. Romeral, "Broken bearings fault detection for a permanent magnet synchronous motor under non-constant working conditions by means of a joint time frequency analysis", in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, Spain, 2007, pp. 3415-3419.
- [25] R. E. Bland, "Acoustic and seismic signal processing for footstep detection", Dissertação de Mestrado, Massachusetts Institute of Technology, MIT, 2006.
- [26] T. Bartosch and D. Seidl, "Spectrogram analysis of selected tremor signals using short-time Fourier transform and continuous wavelet transform", *Annali di Geofisica*, vol. 42, Jun 1999.
- [27] M. K. Kıymık, İ. Güler, A. Dizibüyük, and M. Akin, "Comparison of STFT and wavelet transform methods in determining epileptic seizure activity in EEG signals for real-time application", *Computers in Biology and Medicine*, vol. 35, pp. 603-616, Oct 2005.
- [28] S. Qian and C. Dapang, "Joint time-frequency analysis", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 16, pp. 52-67, 1999.
- [29] E. H. Bouchikhi, V. Choqueuse, M. E. H. Benbouzid, J. F. Charpentier, and G. Barakat, "A comparative study of time-frequency representations for fault detection in wind turbine", in *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, VIC, Australia, 2011, pp. 3584-3589.
- [30] V. Climente-Alarcon, M. Riera-Guasp, J. Antonino-Daviu, J. Roger-Folch, and F. Vedreno-Santos, "Diagnosis of rotor asymmetries in wound rotor induction generators operating under varying load conditions via the Wigner-Ville Distribution", in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Sorrento, Italy, 2012, pp. 1378-1383.
- [31] L. Cohen, *Time-frequency analysis*. Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice-Hall, 1995.
- [32] I. Daubechies, "Where do wavelets come from? A personal point of view", *Proceedings of the IEEE*, vol. 84, pp. 510-513, 1996.
- [33] I. Daubechies, *Ten lectures on wavelets* vol. 61, SIAM, 1992.
- [34] Z. K. Peng and F. L. Chu, "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, pp. 199-221, Mar 2004.
- [35] A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa, "Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 1564-1575, 2011.
- [36] P. W. Tse, W. Yang, and H. Y. Tam, "Machine fault diagnosis through an effective exact wavelet analysis", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 277, pp. 1005-1024, May 2004.

- [37] N. G. Nikolaou and I. A. Antoniadis, "Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets", *NDT & E International*, vol. 35, pp. 197-205, Apr 2002.
- [38] J. Zarei and J. Poshtan, "Bearing fault detection using wavelet packet transform of induction motor stator current", *Tribology International*, vol. 40, pp. 763-769, May 2007.
- [39] J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, and A. Garcia Espinosa, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 633-643, 2008.
- [40] E. C. C. Lau and H. W. Ngan, "Detection of motor bearing outer raceway defect by wavelet packet transformed motor current signature analysis", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, pp. 2683-2690, 2010.
- [41] S. H. Kia, H. Henao, and G. A. Capolino, "Torsional vibration assessment using induction machine electromagnetic torque estimation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 209-219, 2010.
- [42] K. Teotrakool, M. J. Devaney, and L. Eren, "Adjustable-speed drive bearing-fault detection via wavelet packet decomposition", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, pp. 2747-2754, 2009.
- [43] J. R. Stack, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, pp. 735-739, 2004.
- [44] L. Frosini and E. Bassi, "Stator current and motor efficiency as indicators for different types of bearing faults in induction motors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 244-251, 2010.
- [45] M. J. M. Gonçalves, R. C. Creppe, E. G. Marques, and S. M. A. Cruz, "Diagnosis of bearing faults in induction motors by vibration signals – comparison of multiple signal processing approaches", in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Búzios, RJ, Brazil, 2015.
- [46] M. Blodt, P. Granjon, B. Raison, and G. Rostaing, "Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 1813-1822, 2008.
- [47] 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, 1995.

- [48] M. Drif and A. J. M. Cardoso, "Stator fault diagnostics in squirrel cage three-phase induction motor drives using the instantaneous active and reactive power signature analyses", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, pp. 1348-1360, 2014.
- [49] S. M. A. Cruz, "An active-reactive power method for the diagnosis of rotor faults in three-phase induction motors operating under time-varying load conditions", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, pp. 71-84, 2012.
- [50] M. Drif and A. J. M. Cardoso, "The use of the instantaneous-reactive-power signature analysis for rotor-cage-fault diagnostics in three-phase induction motors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 4606-4614, 2009.
- [51] G. R. Bossio, C. H. De Angelo, J. M. Bossio, C. M. Pezzani, and G. O. Garcia, "Separating broken rotor bars and load oscillations on IM fault diagnosis through the instantaneous active and reactive currents", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 4571-4580, 2009.
- [52] L. A. C. Lopes, "Diagnóstico de avarias e correntes parasita em rolamentos de motores alimentados por conversores de frequência", Dissertação de Mestrado, DEEC, UC, 2014.
- [53] J. A. C. Agostinho, "Diagnóstico de avarias nos rolamentos de um motor de indução trifásico", Dissertação de Mestrado, DEEC, UC, 2013.
- [54] J. Lin and L. Qu, "Feature extraction based on morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 234, pp. 135-148, Jun 2000.
- [55] B. Tang, W. Liu, and T. Song, "Wind turbine fault diagnosis based on morlet wavelet transformation and wigner-ville distribution", *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2862-2866, Dec 2010.
- [56] J. Rafiee, M. A. Rafiee, and P. W. Tse, "Application of mother wavelet functions for automatic gear and bearing fault diagnosis", *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 4568-4579, Jun 2010.



# APÊNDICE A – Análise dos sinais elétricos (funcionamento do motor à meia carga)

## Avaria no anel externo

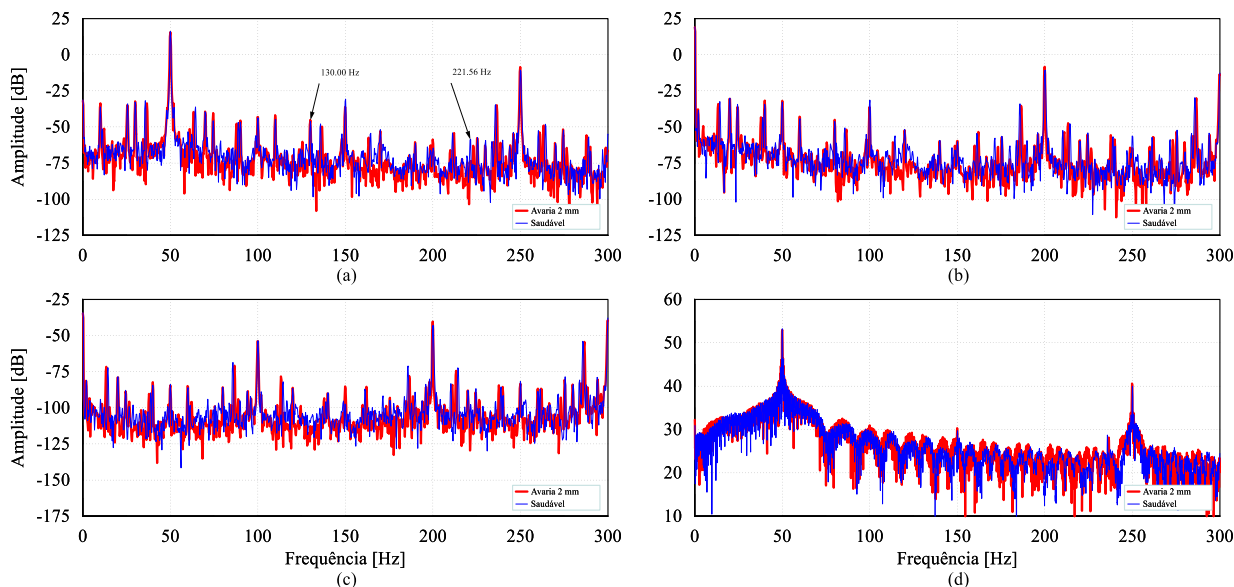


Fig. A 1 - Espectros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.

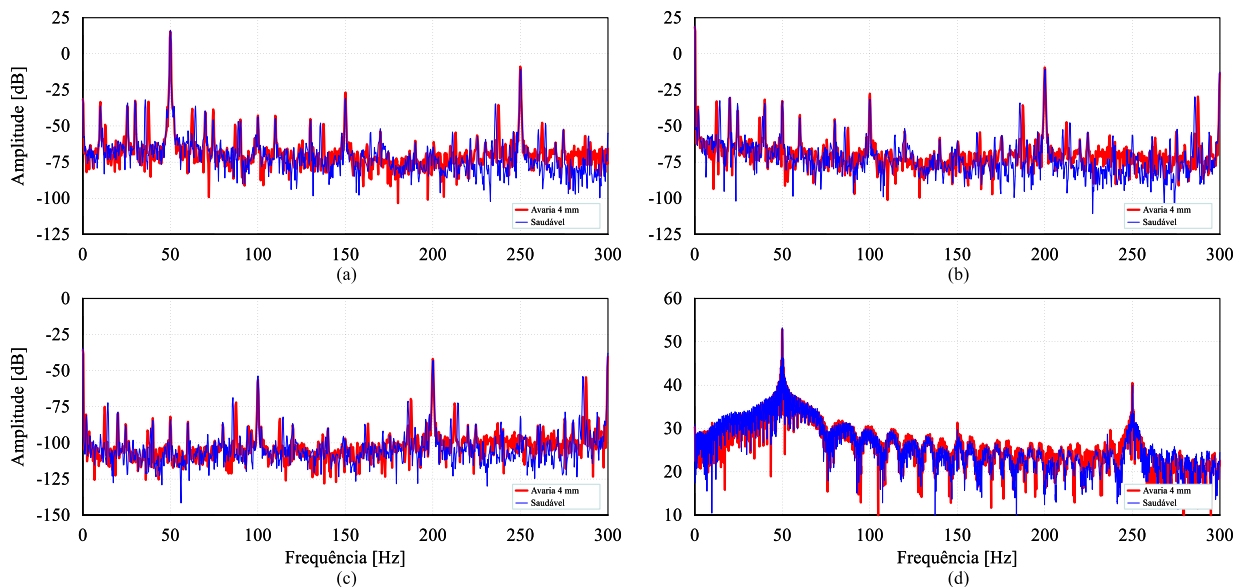
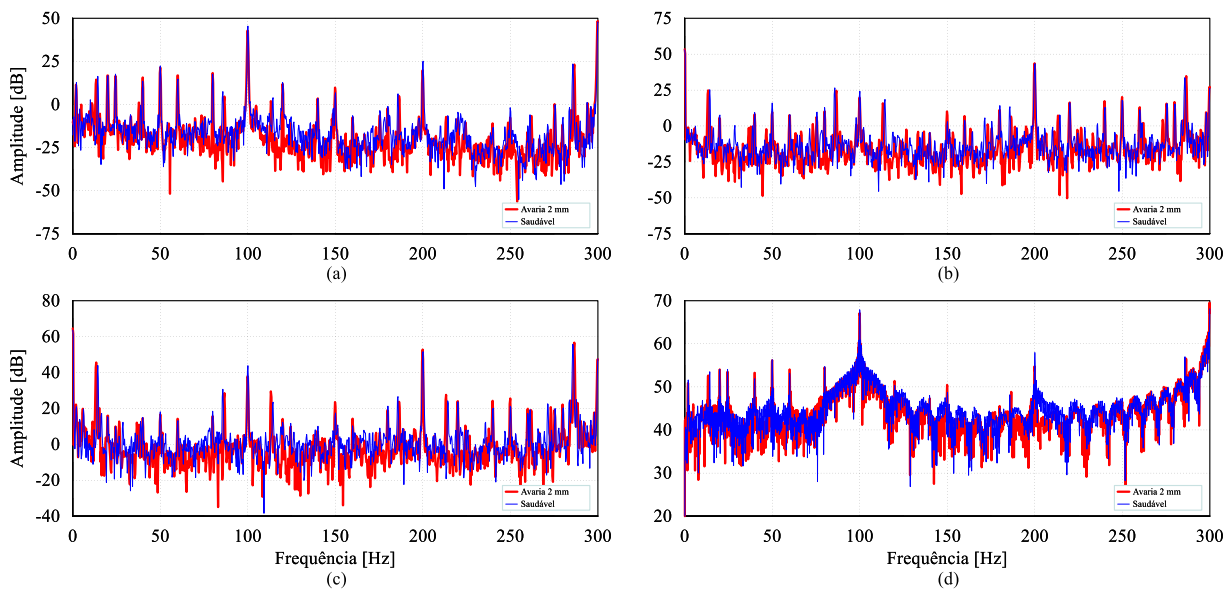
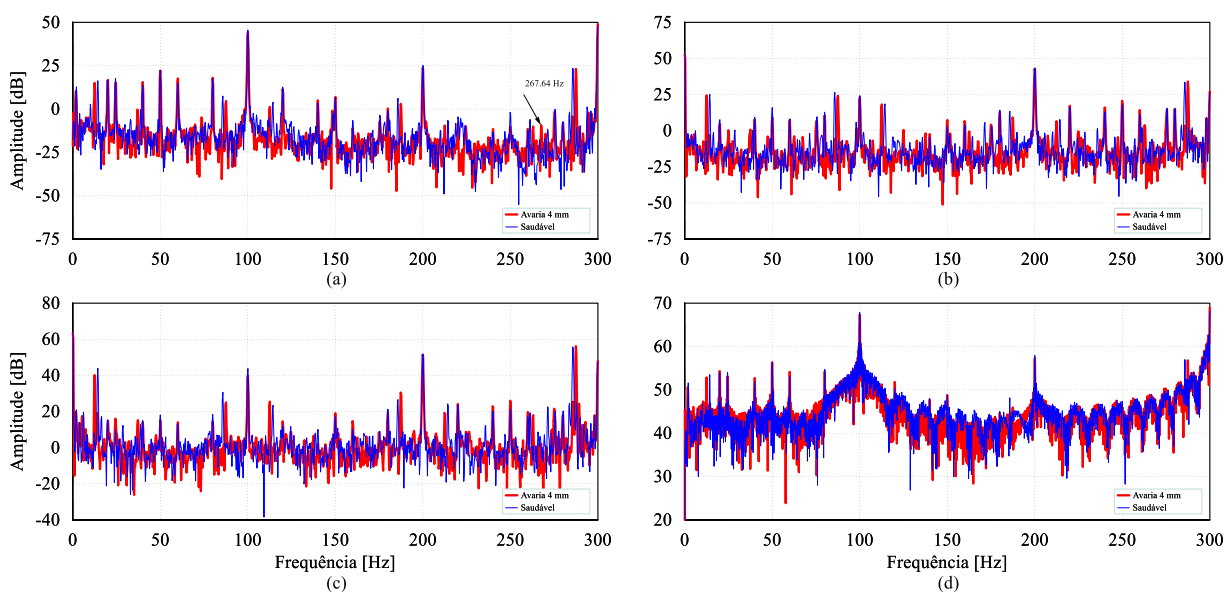


Fig. A 2 - Espectros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.

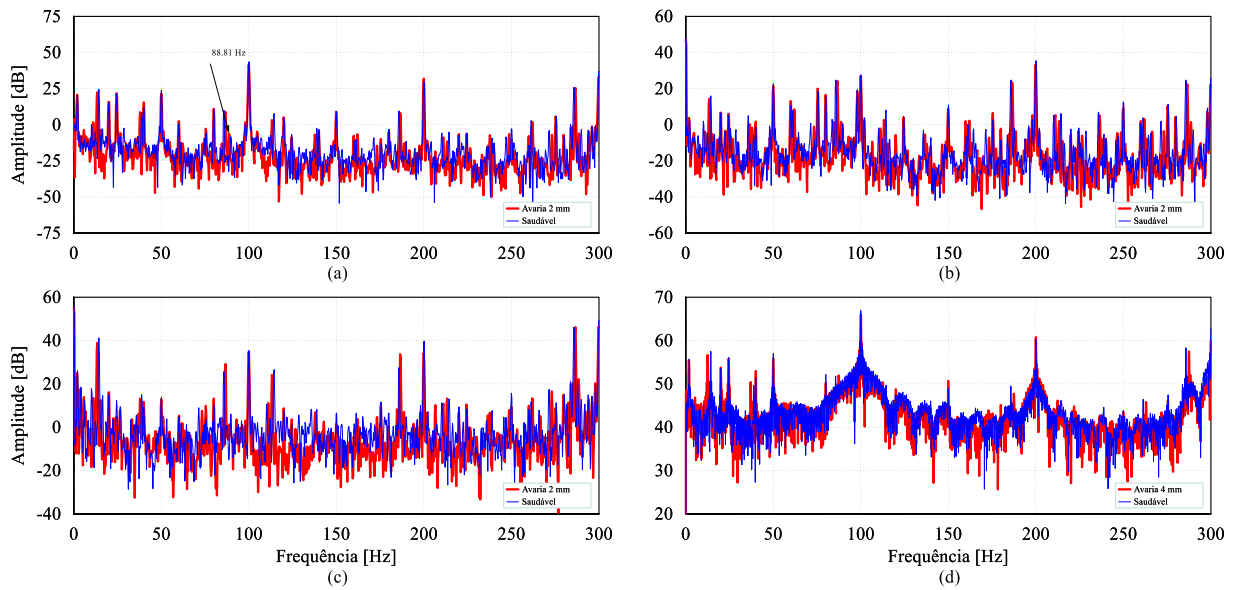




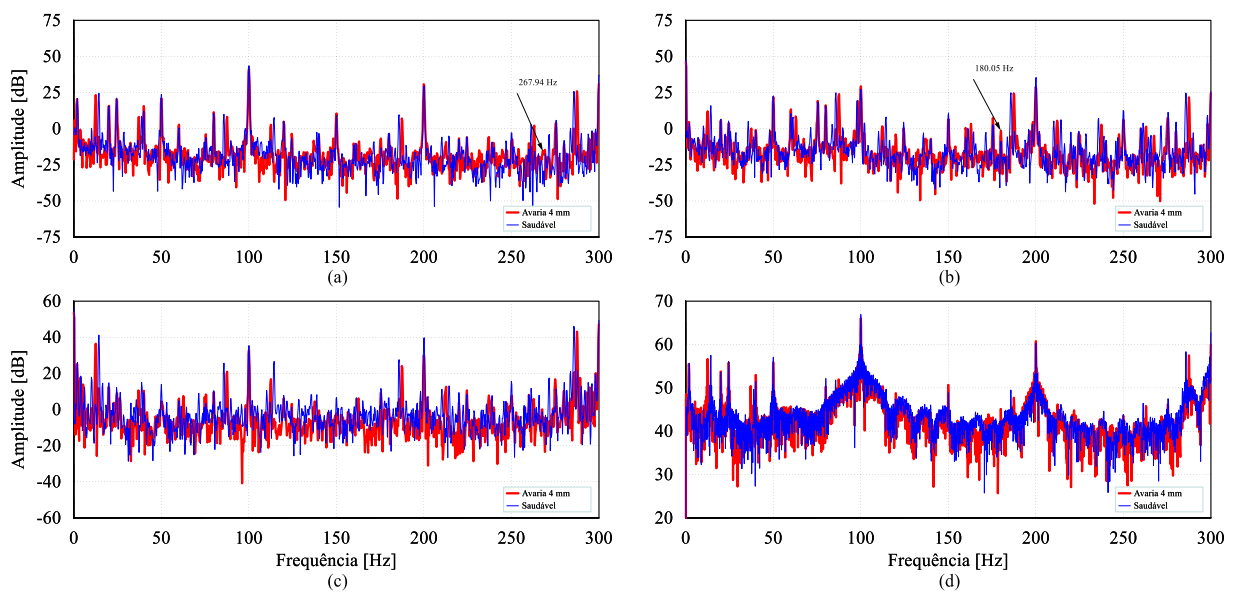
**Fig. A 3 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**



**Fig. A 4 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

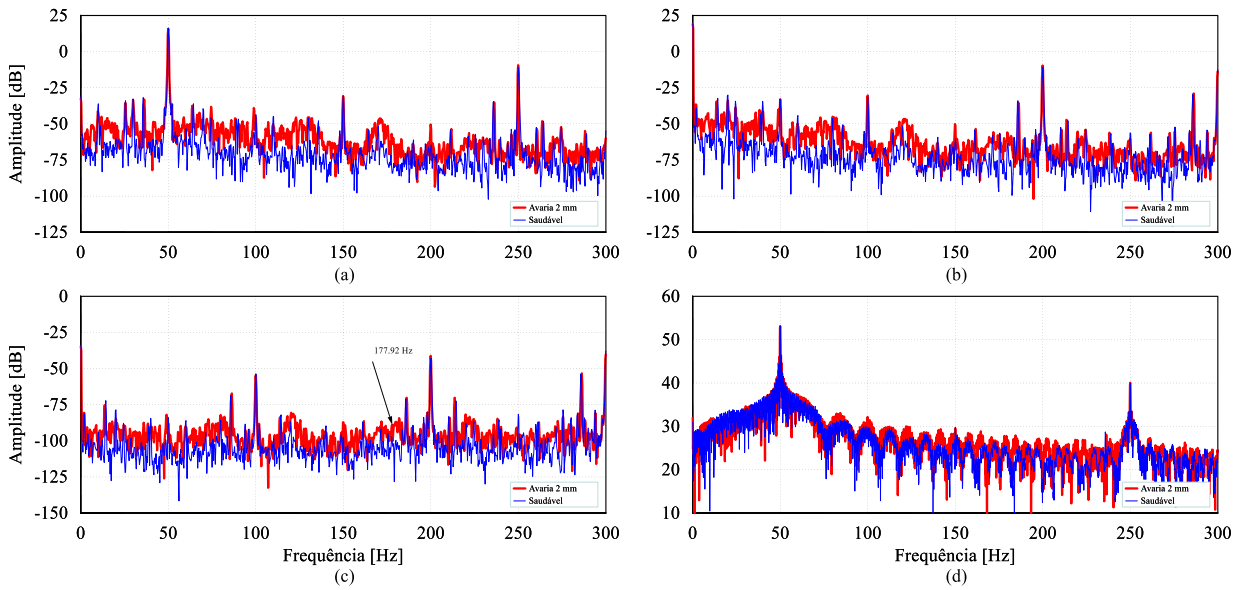


**Fig. A 5 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

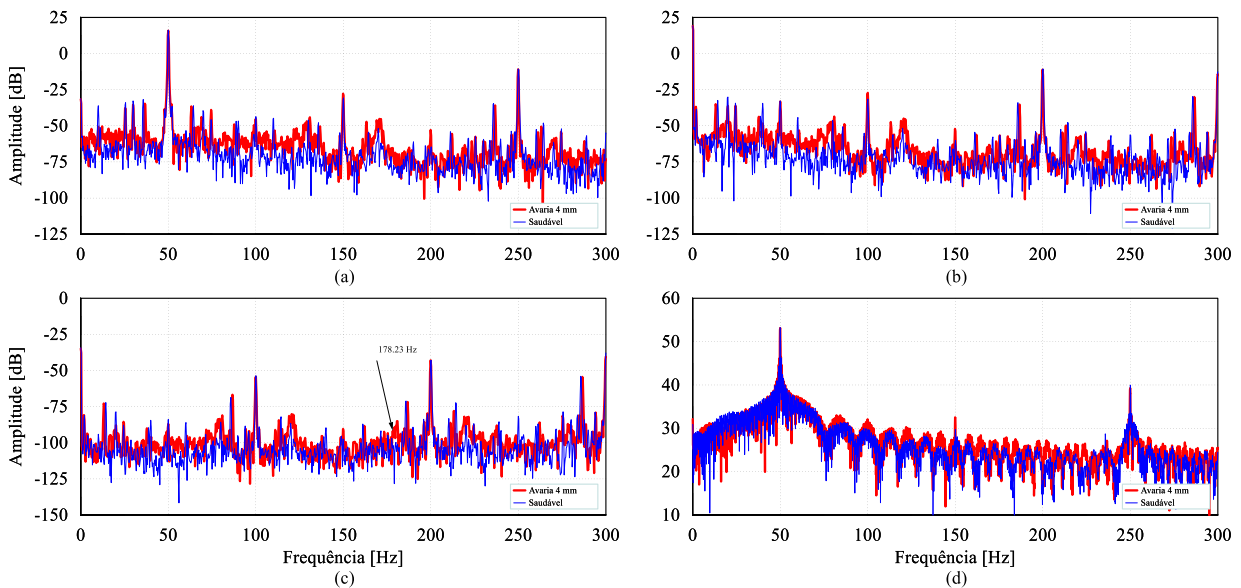


**Fig. A 6 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel externo, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

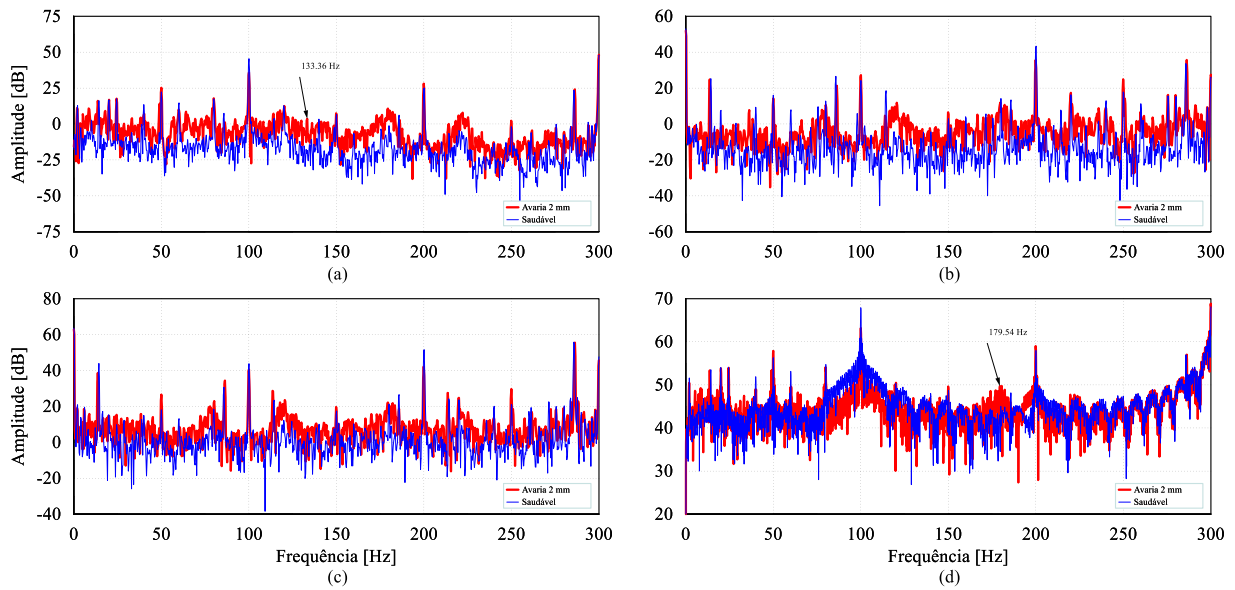
## Avaria no anel interno



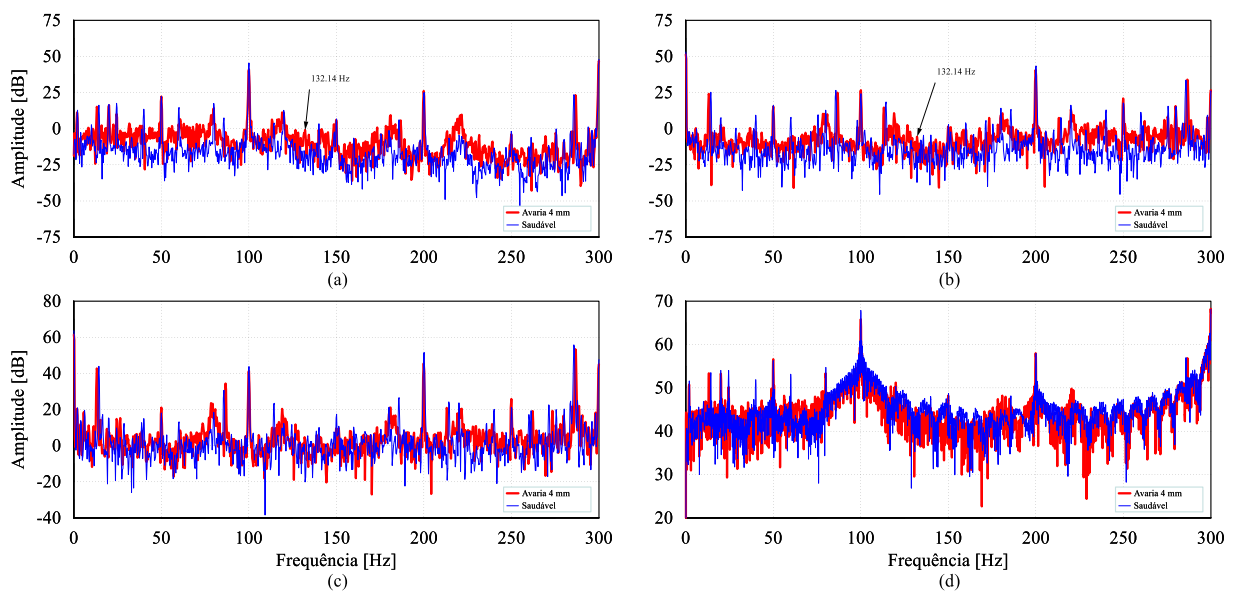
**Fig. A 7 -** Espetros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.



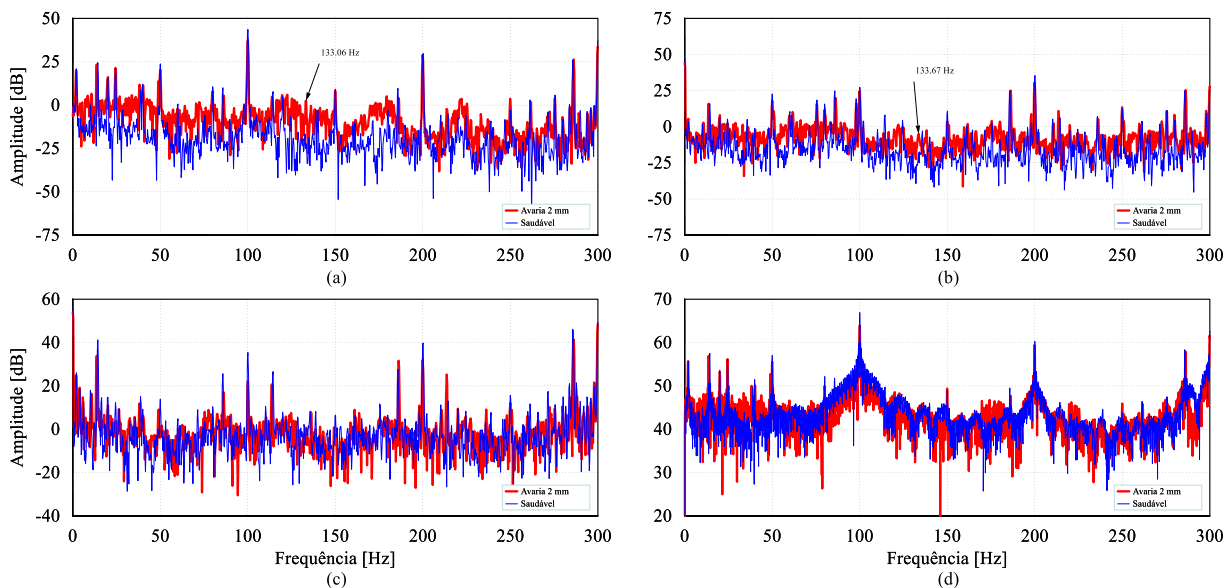
**Fig. A 8 -** Espetros representativos da corrente de alimentação do motor para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.



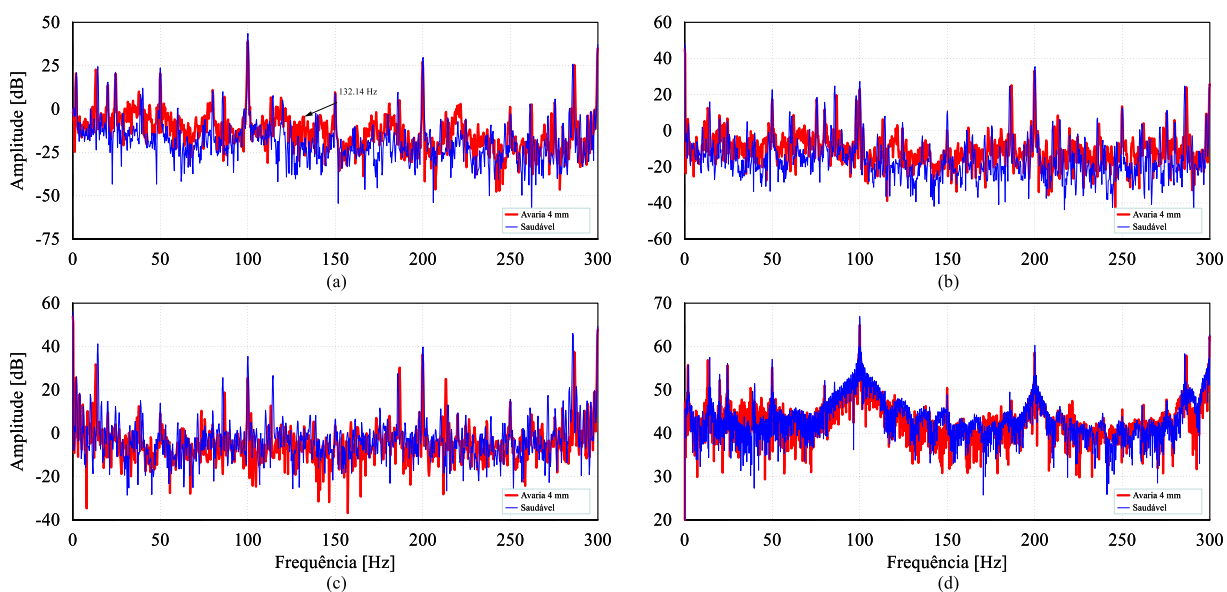
**Fig. A 9 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**



**Fig. A 10 - Espectros representativos da potência ativa instantânea para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 4 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**



**Fig. A 11 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**



**Fig. A 12 - Espectros representativos da potência reativa instantânea para o funcionamento do MIT à meia carga com rolamento saudável e com avaria de 2 mm no anel interno, do lado do ventilador, aplicando as técnicas: (a) FFT; (b) TH; (c) TKEO; (d) CZT.**

## ANEXO I – Características das máquinas elétricas utilizadas nas montagens laboratoriais

---

**TABELA I 1 – CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO (ESTIPULADAS PELO FABRICANTE).**

Marca	WEG
Tensão	400/690 V ( $\Delta$ /Y)
Corrente elétrica	6.15/3.57 A ( $\Delta$ /Y)
Frequência	50 Hz
Potência	3 kW
Número de pólos	4
Rendimento	83 %
Velocidade angular	1440.03 rpm
Fator de potência nominal	0.8
Binário eletromagnético	19.91 Nm
Momento de inércia do motor	0.012 Kgm <sup>2</sup>

**TABELA I 2 - CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA (ESTIPULADAS PELO FABRICANTE).**

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



## ANEXO II – Características dos acondicionadores de sinal

TABELA II 1 - CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DO ACONDICIONADOR DE SINAL (ESTIPULADAS PELO FABRICANTE).

Marca	PCB Piezotronics
Tensão de excitação	18 V
Corrente de excitação	10 mA
Tensão de alimentação	24 V
Corrente (máxima)	60 mA
Gama de frequência	0.2 Hz até 10 kHz

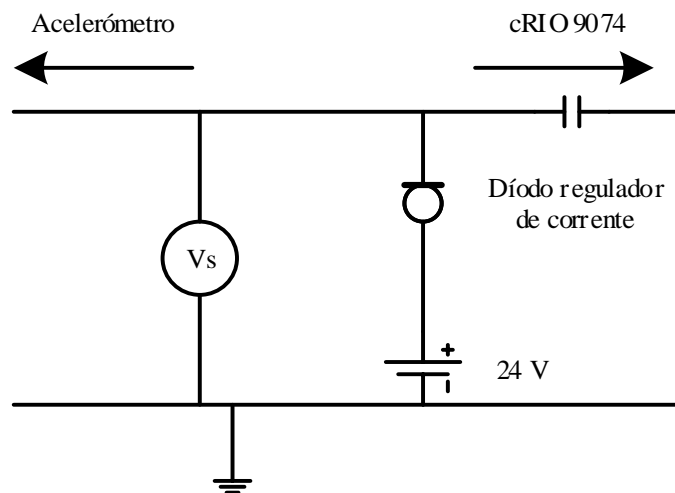


Fig. II 1 – Circuito elétrico do acondicionador de sinal.





# ANEXO III – Funções das onduletas aplicadas na análise dos sinais

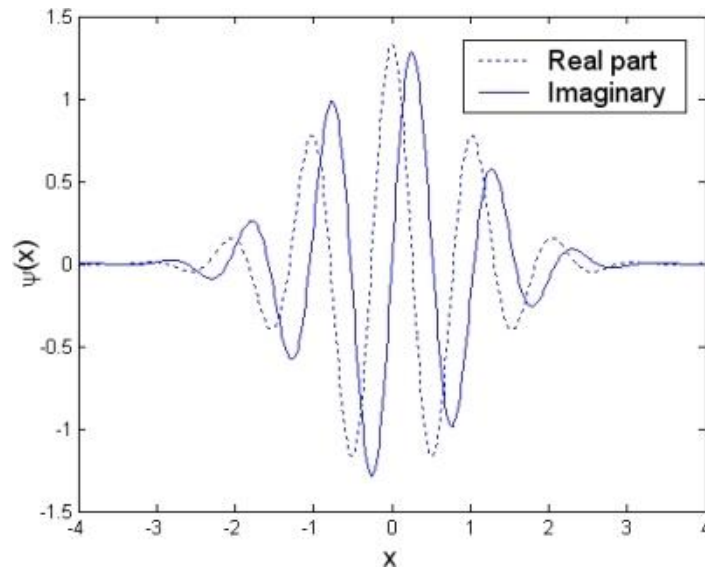


Fig. III 1 – Onduleta Morlet<sup>2</sup>.

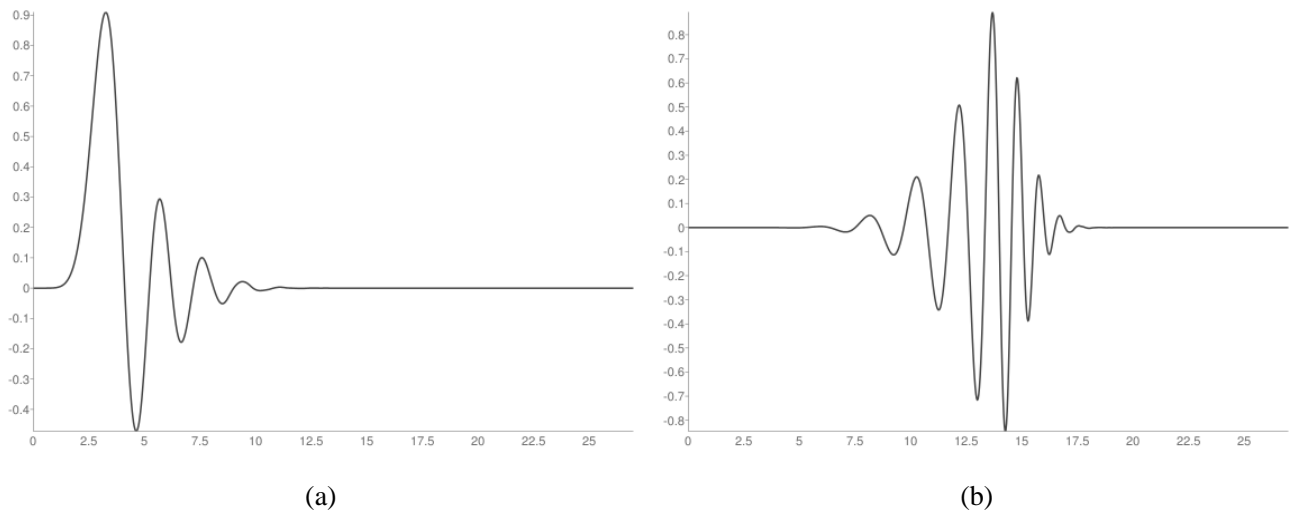


Fig. III 2 – (a) Função escala e (b) onduleta-mãe da onduleta Daubechies 14 (db14)<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Disponível em [http://openi.nlm.nih.gov/detailedresult.php?img=3267224\\_sensors-09-10326f2&req=4](http://openi.nlm.nih.gov/detailedresult.php?img=3267224_sensors-09-10326f2&req=4) – Julho 2015.

<sup>3</sup> Disponíveis em <http://wavelets.pybytes.com/> - Julho 2015.