

Tiago Miguel Medeiros Róia

# RUÍDO ACÚSTICO EM ACIONAMENTOS ELÉTRICOS

Dissertação de Mestrado

Fevereiro 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA





UNIVERSIDADE DE COIMBRA

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

## Ruído acústico em acionamentos elétricos

Tiago Miguel Medeiros Róia

### **Membros do Júri:**

Presidente: Professor Doutor Jaime Baptista dos Santos

Orientador: Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz

Vogal: Professor Doutor Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira

Fevereiro 2016

Coimbra



# Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero expressar o meu particular agradecimento ao Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz pela disponibilidade, empenho e apoio dado ao longo da realização desta dissertação. Quero ainda agradecer-lhe a oportunidade dada e a confiança que deposita em mim, como também a sua orientação que foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais e ao meu irmão pois é graças a eles que me encontro a escrever estes agradecimentos. A eles, agradeço todo o apoio, carinho, conselhos e motivação presenteado durante este trabalho como ao longo da minha vida.

A todos os meus colegas e amigos de laboratório, em especial, ao Emanuel Marques, Mário Gonçalves, Hazem Hadla, André Gonçalves e Pedro Gonçalves, agradeço todo o companheirismo e solidariedade manifestadas no decorrer do trabalho.

Por fim, mas não menos importantes, a todos os meus amigos que me acompanharam ao longo desta jornada e em especial, à Ana Serpa, Ruben Pastor, André Medeiros, Filipe Mendes, João Góis, Pedro Soares, Daniel Franco, Diogo Ribeiro, Paulo Alves, Hugo Paiva, Luís Quesado, Joana Laranjeiro, Raquel Laranjeiro, Diana Costa, Guida Peixoto, Pedro Alcaface, David Pereira, Pedro Fagulha, Pedro Santos, Diogo Pinto, Hugo Silva e Claudia Gaspar, agradeço o companheirismo e todos os momentos de alegria passados juntos que levo comigo para o resto da vida.

**A todos, Obrigado.**



# Resumo

Os temas nucleares desta dissertação são, de uma forma geral, a avaliação e caracterização dos espectros sonoros emitidos pelos motores de indução trifásicos, com diferentes tipos de avarias mecânicas e diferentes estratégias de controlo de acionamentos elétricos.

Este documento está estruturado da seguinte forma:

O capítulo 1 exhibe o enquadramento do tema sobre o qual se desenvolveu esta dissertação.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos gerais relacionados com o som. Inicialmente é explorada a anatomia do ouvido humano, desde a captação até à descodificação do som em impulsos elétricos. São também definidas as principais grandezas acústicas fundamentais para a medição do ruído e por último, são fornecidos alguns conceitos gerais relacionados com as ondas de pressão sonora, desde modos de propagação até fatores que contribuem para a atenuação.

O capítulo 3 explora as principais fontes de ruído sonoro do motor de indução trifásico com origem mecânica, aerodinâmica e eletromagnética. Também são explorados os diferentes tipos de acionamentos elétricos usados no decorrer desta dissertação, o controlo escalar, o controlo direto de binário e o controlo de campo orientado no rotor.

No capítulo 4 é feita uma descrição das montagens experimentais, equipamentos e procedimentos utilizados na realização das medições. De seguida é efetuada a análise de alguns espectros de ruído acústico obtidos para diferentes condições de funcionamento e de regimes de carga. Semelhante análise foi possível graças à aplicação de rolamentos com avarias nos anéis interno ou externo com diferentes graus de severidade e à inserção de rotores com um número distinto de barras fraturadas. A influência de diferentes estratégias de controlo de acionamentos elétricos também é alvo de análise.

Finalmente, o capítulo 5 expõe as principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido e propõe algumas sugestões para trabalho futuro.



# Abstract

The nuclear themes of the thesis are, in general, the evaluation and characterization of the sound spectrum issued by three-phase induction motors under different types of mechanical malfunctions and different control strategies used in electric drives.

This document has the following structure:

Chapter 1 explains the framing of the theme of this thesis.

In chapter 2 are presented some general concepts related to sound. Initially it is explored the anatomy of the human ear, from the capturing of sound to its decoding into electrical impulses. The main acoustical magnitudes, essential to measure the noise, are also defined. In the end of the chapter are presented some aspects related to sound pressure waves, from forms of propagation to attenuation factors.

Chapter 3 explores the main sources of noise in a three-phase induction motor with mechanical, aerodynamic or electromagnetic origin. An explanation of the control strategies used in this dissertation, scale control, direct torque control and rotor field oriented control is presented.

In chapter 4 are described the experimental setups, equipment characteristics and procedures used when carrying out the measurements. Then, it is carried out an analysis of some acoustic noise spectra obtained from different working and loading conditions. To evaluate the impact of faults in the motor, were applied bearings with different fault degrees in the external and internal rings as well as rotors with one or two broken bars. The influence of different control strategies used in electric drives is also addressed.

Chapter 5 presents the main conclusions of the work developed and some suggestions for future work.



*"There is no good in anything until it is finished"*

Genghis Khan



# Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Acrónimos	xi
Lista de Figuras	xx
Lista de Tabelas	xxii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Motivação e objetivos da dissertação . . . . .	2
<b>2 Conceitos básicos de som e ruído</b>	<b>3</b>
2.1 Ouvido humano . . . . .	3
2.2 Grandezas acústicas . . . . .	6
2.3 Propagação da onda sonora . . . . .	8
<b>3 Ruído acústico emitido por motores de indução e acionamentos elétricos</b>	<b>13</b>
3.1 Ruído acústico emitido por motores de indução . . . . .	13
3.2 Variadores eletrónicos de velocidade . . . . .	22
<b>4 Resultados Experimentais</b>	<b>25</b>
4.1 Equipamento e procedimento utilizado para aquisição do som . . . . .	25
4.2 Ensaios Realizados . . . . .	26
4.2.1 Funcionamento normal . . . . .	26
4.2.2 Avarias nos rolamentos . . . . .	34
4.2.2.1 Avaria no anel externo do rolamento . . . . .	36

4.2.2.2	Avaria no anel interno do rolamento . . . . .	44
4.2.3	Avaria nas barras do rotor . . . . .	50
4.2.4	Acionamento com controlo direto de binário e por orientação do campo rotórico . . . . .	57
4.2.5	Medições em condições distintas . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Conclusão e trabalho futuro</b>	<b>63</b>
5.1	Conclusão . . . . .	63
5.2	Trabalho futuro . . . . .	65
	<b>Bibliografia</b>	<b>66</b>
	<b>Anexo A Limites de potência sonora de acordo com a IEC 60034-9</b>	<b>73</b>
	<b>Anexo B Características dos equipamentos utilizados nos ensaios</b>	<b>75</b>

# Lista de Acrónimos

**FFT**      *Fast Fourier Transform* - Transformada Rápida de Fourier

**IEC**      *International electrotechnical commission*

**ISO**      *International organization for standartization*



# Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidades
$A$	Amplitude da pressão sonora	Pa
$\beta$	Ângulo de contacto	graus
$c$	Velocidade do som	$m/s$
$D$	Diâmetro da parte externa do estator	m
$D_B$	Diâmetro da esfera	mm
$D_p$	Diâmetro primitivo	mm
$f_B$	Frequência característica da esfera	Hz
$f$	Frequência do som	Hz
$f_{asyst}$	Frequência característica da excentricidade do tipo estática	Hz
$f_{asydy}$	Frequência característica da excentricidade do tipo dinâmica	Hz
$f_{bbr}$	Frequência característica de avaria nas barras do rotor	Hz
$f_c$	Frequência de comutação do variador eletrónico de velocidade	Hz
$f_{eixo}$	Frequência provocada pelo desalinhamento do eixo	Hz
$f_{ext}$	Frequência característica do anel externo	Hz
$f_{tang}$	Frequência das forças tangenciais nos dentes do estator	Hz
$f_{gaiola}$	Frequência característica da gaiola	Hz
$f_{int}$	Frequência característica do anel interno	Hz
$f_p$	Frequência característica do ventilador	Hz
$f_r$	Frequência mecânica de rotação do rotor	Hz
$f_s$	Frequência da rede de alimentação	Hz
$f_{vel}$	Frequência da velocidade mecânica eixo	Hz
$f_{vext}$	Frequência característica no sinal de vibração de anomalia no anel externo	Hz

$f_{vint}$	Frequência característica no sinal de vibração de anomalia no anel interno	Hz
$f_{exc+folga}$	Frequência provocado pela excentricidade e folgas	Hz
$f_0$	Frequência de ressonância do material ferromagnético	Hz
$G$	Razão entre o peso do conjunto material ferromagnético e dentes com o peso do material ferromagnético	Kg
$H$	Profundidade do material ferromagnético do estator sem contabilizar a espessura da ranhura	m
$h$	Altura da barreira colocada entre a fonte sonora e o recetor	m
$I$	Intensidade sonora	$W/m^2$
$I_0$	Intensidade sonora de referência	$W/m^2$
$k$	Número de ondas angular	$m^{-1}$
$\lambda$	Comprimento de onda	m
$L_I$	Nível de intensidade sonora	dB
$L_{eq}$	Nível sonoro contínuo equivalente	dB
$L_p$	Nível de pressão sonora	dB
$L_w$	Nível de potência sonora	dB
$L_{eq\_A}$	Nível sonoro contínuo equivalente com filtro de ponderação A	dB
$L_{p\_A}$	Nível de pressão sonora com filtro de ponderação A	dB
$L_{p\_C}$	Nível de pressão sonora com filtro de ponderação C	dB
$m$	Modo de vibração	
$N_B$	Número de esferas	
$N_r$	Número de ranhuras do rotor	
$N_s$	Número de ranhuras do estator	
$n_m$	Velocidade do veio do motor	rpm
$n_s$	Velocidade síncrona	rpm
$P$	Número de par de polos	
$p$	Pressão sonora	Pa
$p_0$	Pressão sonora de referência	Pa
$p_r$	Valor eficaz da pressão sonora à distância $r$	Pa
$\phi$	Fase de onda	rad

$Q$	Número natural	
$\rho$	Densidade do ar	$kg/m^3$
$r$	Distância à fonte emissora	m
$S$	Área correspondente ao tipo de onda	$m^2$
$s$	Deslizamento da máquina de indução	
$T$	Tempo de exposição	s
$t$	Tempo	s
$W_p$	Potência Sonora	W
$W_0$	Potência de referência	W
$w$	Frequência angular do som	rad/s
$x$	Número inteiro	
$Z$	Número natural	



# Lista de Figuras

2.1	Ouvido humano. . . . .	4
2.2	Curvas isófonicas [4, 9]. . . . .	5
2.3	Filtros de ponderação [4]. . . . .	5
2.4	Onda de propagação de um motor elétrico ao ar livre. . . . .	9
2.5	Atenuação da onda sonora provocada pela distância à fonte [13]. . . . .	9
2.6	Atenuação da onda sonora provocada pelo vento em função à distância [13]. . . . .	10
2.7	Atenuação da onda sonora provocada pela utilização de barreiras. . . . .	10
2.8	Variação do nível sonoro numa sala prática em função da distância à fonte [4]. . . . .	11
3.1	Motor de indução trifásico aberto e corte transversal: (a) motor aberto; (b) corte transversal do motor. . . . .	13
3.2	Fontes de ruído e modos de propagação do som. . . . .	14
3.3	Tipos de pá do ventilador: (a) pá do tipo radial; (b) pá do tipo centrifuga. . . . .	14
3.4	Distribuição não uniforme da densidade de fluxo [28]. . . . .	16
3.5	(a) Modos de vibração; (b) deflexão do material ferromagnético do estator. . . . .	17
3.6	Tipos de excentricidades: (a) rotor concêntrico com o estator; (b) excentricidade estática; (c) excentricidade dinâmica. . . . .	17
3.7	Tipos de rolamentos: (a) rolamento deslizante; (b) rolamento de esferas. . . . .	19
3.8	Componentes de um rolamento de esferas [41]. . . . .	19
3.9	Impacto do incremento de carga e redução da vibração no tempo de vida útil do rolamento [32]. . . . .	21
3.10	Esquema de montagem e princípio de funcionamento de um variador eletrónico de velocidade. . . . .	22
3.11	Espectro da pressão sonora relativo às componentes espectrais em torno de $f_c$ e dos seus harmónicos. Adaptado de [50]. . . . .	23
4.1	Disposição do sistema de aquisição do sinal sonoro. . . . .	26

4.2	Espetros sonoros do motor em boas condições quando alimentado diretamente da rede: (a) regime de vazio; (b) funcionamento à plena carga. . . . .	27
4.3	Espetros sonoros do motor em boas condições e alimentado por intermédio de um variador de velocidade industrial: (a) regime de vazio; (b) à plena carga.	30
4.4	Espetro sonoro do motor alimentado pelo variador de velocidade para várias frequências: (a) $f_c = 4$ kHz; (b) $f_c = 8$ kHz; (c) $f_c = 12$ kHz; (d) $f_c = 16$ kHz.	31
4.5	Nível sonoro contínuo equivalente para diferentes valores de frequência de comutação e de frequência de operação do acionamento. . . . .	32
4.6	Espetro sonoro para as frequências de comutação: (a) 4 kHz (Gama: 3650 - 4350 Hz); (b) de 4 kHz (Gama: 7650 - 8350 Hz); (c) 12 kHz (Gama: 11700 - 12300 Hz). . . . .	33
4.7	Esquemas de montagem utilizados nas avarias nos rolamentos: (a) alimentado diretamente da rede; (b) recorrendo a um variador de velocidade industrial. .	34
4.8	Rolamentos com furos únicos de 2 e 4 mm. . . . .	35
4.9	Espetros sonoros do motor ligado diretamente da rede e em vazio, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . .	37
4.10	Espetros sonoros do motor ligado diretamente da rede e em vazio, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . .	38
4.11	Espetros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.	39
4.12	Espetros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.	40
4.13	Espetros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e em vazio, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . . .	41
4.14	Espetros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e em vazio, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . . .	42
4.15	Espetros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . . .	42
4.16	Espetros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . . .	43

4.17	Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e em vazio, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . .	45
4.18	Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e em vazio, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . .	45
4.19	Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.	46
4.20	Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.	46
4.21	Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e em vazio, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . . .	48
4.22	Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e em vazio, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . . .	48
4.23	Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . . .	49
4.24	Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm. . . . .	49
4.25	Esquemas de montagem utilizados na avaria nas barras do rotor: (a) alimentado diretamente da rede; (b) recorrendo a um variador de velocidade industrial.	51
4.26	Rotor com uma e duas barras fraturadas. . . . .	52
4.27	Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria nas barras do rotor: (a) 1 barra fraturada; (b) duas barras fraturadas.	53
4.28	Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria nas barras do rotor: (a) 1 barra fraturada; (b) duas barras fraturadas.	53
4.29	Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria nas barras do rotor: (a) 1 barra fraturada; (b) duas barras fraturadas.	55
4.30	Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria nas barras do rotor: (a) 1 barra fraturada; (b) duas barras fraturadas.	56
4.31	Motor de indução trifásico controlado por uma plataforma de controlo digital dSPACE 1103. . . . .	58

4.32	Espetros sonoros do motor para as diferentes estratégias de controlo: (a) controlo direto de binário; (b) controlo por orientação do campo rotórico. . .	59
4.33	Espetros para acionamentos do tipo: (a) controlo direto de binário; (b) controlo por orientação do campo rotórico. . . . .	60
4.34	Espetro sonoro do motor obtido com o conjunto sonómetro mais microfone posicionado ao dobro da distância. . . . .	61
4.35	Espetro sonoro do motor obtido com uma fonte externa a emitir ruído acústico.	62

# Lista de Tabelas

4.1	Especificações do sonómetro e microfone utilizados nos ensaios experimentais.	25
4.2	Causas e frequências características para as diferentes fontes de ruído sonoro num motor de indução trifásico. . . . .	28
4.3	Características dos rolamentos. . . . .	35
4.4	Velocidade e frequência mecânica de rotação do rotor para diferentes regimes de carga do motor de indução trifásico utilizado nas avarias nos rolamentos. .	35
4.5	Frequências características das avarias estudadas no rolamento para diferentes regimes de carga do motor. . . . .	36
4.6	Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para avaria nos rolamentos e o motor de indução trifásico alimentado diretamente da rede. . .	50
4.7	Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para avaria nos rolamentos e o motor de indução trifásico alimentado por um variador de velocidade industrial. . . . .	50
4.8	Velocidade e frequência mecânica de rotação do rotor para os diferentes regimes de carga e avaria nas barras do rotor. . . . .	51
4.9	Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para avaria nas barras do rotor e o motor de indução trifásico alimentado diretamente da rede. .	57
4.10	Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para avaria nas barras do rotor e o motor de indução trifásico alimentado por um variador de velocidade industrial. . . . .	57
4.11	Velocidade e frequência mecânica de rotação do rotor para diferentes regimes de carga e controlos. . . . .	58
4.12	Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para os diferentes ensaios realizados com o controlo direto de binário e com o controlo por orientação do campo rotórico. . . . .	60
4.13	Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para o conjunto do sonómetro mais microfone ao dobro da distância. . . . .	61

4.14	Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo na presença de uma fonte sonora externa. . . . .	62
A.1	Nível de potência sonora ponderado <i>A</i> máximo, expresso em dB no regime de funcionamento do motor em vazio. . . . .	73
B.1	Equipamento utilizado nos ensaios realizados para as avarias nos rolamentos.	75
B.2	Equipamento utilizado nos ensaios realizados para a avaria nas barras do rotor.	76
B.3	Equipamento utilizado nos ensaios realizados para a variação da frequência de comutação e de operação. . . . .	76
B.4	Motores utilizados para o acionamento com controlo direto de binário e por orientação do campo rotórico. . . . .	77

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

O motor de indução converteu-se no tipo de motor mais utilizado em processos industriais desde a sua invenção no final do século XIX. Nos países desenvolvidos a nível industrial, cerca de 60 % do consumo total de energia elétrica é absorvida por motores de indução. A preferência por este tipo de motor prende-se com a sua elevada robustez, simples manutenção e baixo custo de aquisição quando comparado com outros tipos de motores elétricos [1].

No entanto, como todas as máquinas elétricas, os motores de indução estão sujeitos a falhas elétricas e mecânicas. Devido à sua grande disseminação no setor industrial e panóplia de aplicações onde se encontra inserido, é considerado por muitos autores um componente crítico, tornando-se indispensável a sua monitorização para deteção de avarias. Cerca de 40 a 50 % das avarias nos motores de indução tem origem nos rolamentos e 5 a 10 % no rotor [2].

A fim de não interromper os processos de fabrico que dependem do normal funcionamento dos motores de indução, o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico de avarias tem possuído um papel crucial na área da engenharia eletrotécnica. Os sistemas de monitorização são desenvolvidos para detetar modos de falha específicas num dos três componentes principais dos motores de indução: estator, rotor e rolamentos [3].

No desenvolvimento de sistemas de diagnóstico de avarias, a análise através de sinais sonoros ainda não foi suficientemente aprofundada como uma técnica alternativa aos sistemas de monitorização convencionais [2], isto porque os sistemas de diagnóstico convencionais baseiam-se na leitura e análise de grandezas térmicas ou de vibração, ou nas grandezas elétricas acessíveis aos terminais da máquina ou fonte de alimentação [3].

O estudo e desenvolvimento destes sistemas é de extrema importância pois permite mitigar os impactos da avaria no tempo de vida útil da máquina e no processo onde esta se

encontra inserida. Com isto garante-se um aumento de fiabilidade e uma redução de custos de manutenção.

Para além da sua forte implementação a nível industrial, o motor de indução também é fortemente utilizado em aplicações domésticas, máquinas de lavar, como também em aplicações comerciais, sistemas de ar condicionado, escadas rolantes e elevadores. Assim sendo, torna-se importante compreender a origem do ruído acústico, por parte destes acionamentos, de forma a atenuar os riscos inerentes à exposição da pessoa cingida a este ambiente.

## **1.2 Motivação e objetivos da dissertação**

Tendo em mente a lacuna existente no desenvolvimento de sistemas de diagnóstico de avarias baseados em sinais sonoros emitidos pelo motor de indução, para ambiente industrial, o principal objetivo e motivação desta dissertação foi desenvolver um sistema de diagnóstico capaz de utilizar esta grandeza como meio de deteção de avarias nos rolamentos e detetar fraturas nas barras do rotor.

Para além das avarias aplicadas ao motor, são ainda analisadas a influência que cada estratégia de controlo de acionamentos elétricos tem na emissão de ruído por parte do motor.

# Capítulo 2

## Conceitos básicos de som e ruído

Neste capítulo são abordados conceitos e noções gerais da acústica, importantes para uma melhor compreensão dos capítulos seguintes.

O ruído pode ser associado a uma distorção de um sinal elétrico ou, também, a um som intenso capaz de danificar o sistema auditivo. Esta distorção ou som pode conter informação útil sobre o funcionamento adequado de uma máquina elétrica. Qualquer tipo de ruído acústico é um som, no entanto, nem todo o som é ruído acústico uma vez que é uma noção subjetiva que não depende apenas da frequência e da amplitude [4–6].

O som e/ou ruído provém de uma variação da pressão ambiente provocada pela vibração de um objeto. Esta vibração perturba as moléculas em torno do objeto e origina uma sequência de compressões e rarefações [5], resultando na formação de uma onda sonora. O número de variações de pressão por segundo indica a frequência do som,  $f$ , e é expressa em *Hertz* (Hz). A gama de frequências audíveis pelo ouvido humano está compreendida entre os 20 Hz e os 20000 Hz [7], sendo que os sons emitidos com frequências abaixo dos 20 Hz são designados por infrassons e os emitidos acima dos 20000 Hz são designados por ultrassons. Estas gamas de frequência possuem inúmeras aplicações, onde por exemplo a gama de frequência de infrassons é utilizada na sismologia e a gama de ultrassons no mapeamento geográfico e ecolocalização.

### 2.1 Ouvido humano

O ouvido humano é dividido em três partes: o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno. O ouvido externo é constituído pelo pavilhão auricular e canal auditivo, sendo a sua principal função a captação e redirecionamento da onda sonora para o ouvido médio de forma a provocar uma vibração na membrana do tímpano, que é a interface com o ouvido médio, ilustrado na figura 2.1. Na membrana do tímpano encontram-se fixados três ossículos

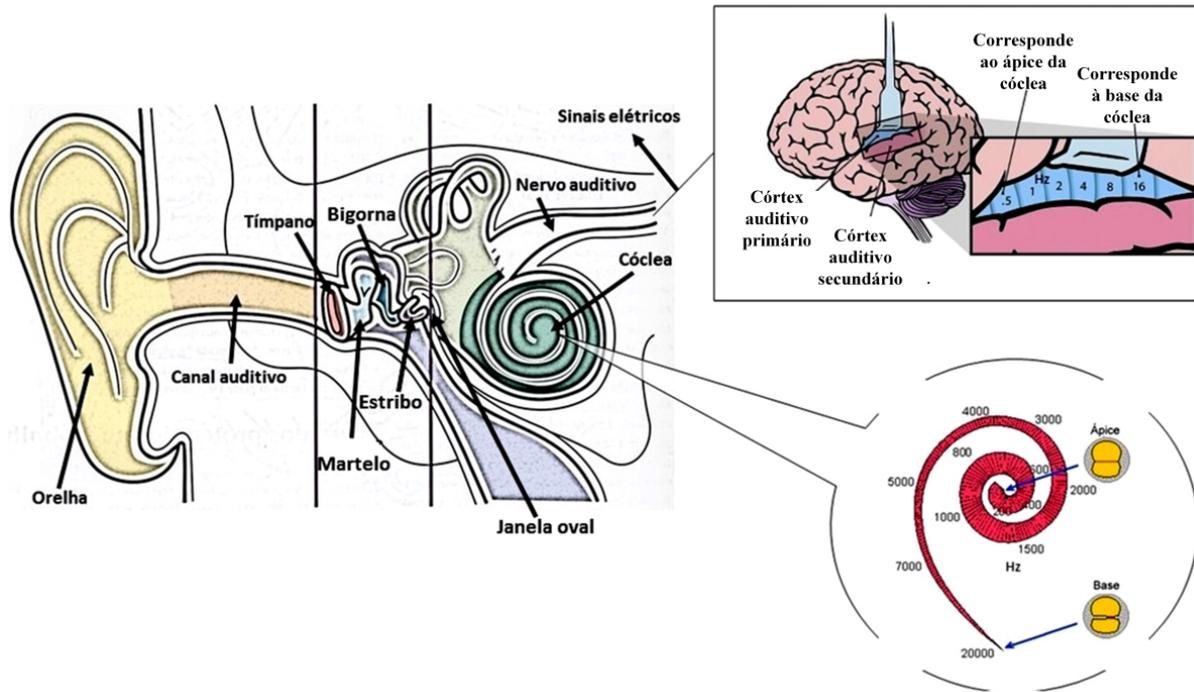


Figura 2.1: Ouvido humano.

designados por martelo, bigorna e estribo. Este conjunto de pequenos ossos são responsáveis pelo transporte do movimento vibratório do tímpano para a janela oval, estando esta localizada entre o estribo e a cóclea. Nesta zona ocorre a transição do meio de propagação, uma vez que a impedância característica do ar difere da impedância característica da cóclea.

A força aplicada na janela oval tem um fator de amplificação 1,3:1 em relação à força aplicada no tímpano que, associado ao facto da área da janela oval ser dezassete vezes menor do que a do tímpano, faz com que pressão na janela oval, transmitida para a cóclea, seja amplificada por um fator de 22 relativamente à pressão no tímpano. Esta relação traduz-se num ganho de 27 dB no nível de pressão, garantindo assim que a intensidade sonora que incide no tímpano é transmitida na totalidade para a cóclea. Este ganho é válido para uma frequência de 1 kHz, existindo uma redução do ganho para a restante gama de frequências.

O ouvido interno é constituído por duas partes: o labirinto ósseo e o labirinto membranoso. No labirinto membranoso encontra-se a cóclea onde ocorre a deteção e codificação dos sinais sonoros em impulsos elétricos [4,5].

A figura 2.2 ilustra a área de audição do ser humano e as curvas isofónicas. Estas curvas são obtidas pela junção de pontos com o mesmo nível de audibilidade, pontos que provocam a mesma sensação audível ao longo do espectro de frequência e para diferentes níveis de pressão sonora. A unidade que representa o nível de audibilidade é o *fone*. É de salientar que o ouvido humano é mais sensível a frequências entre 1 kHz e 4 kHz [8].

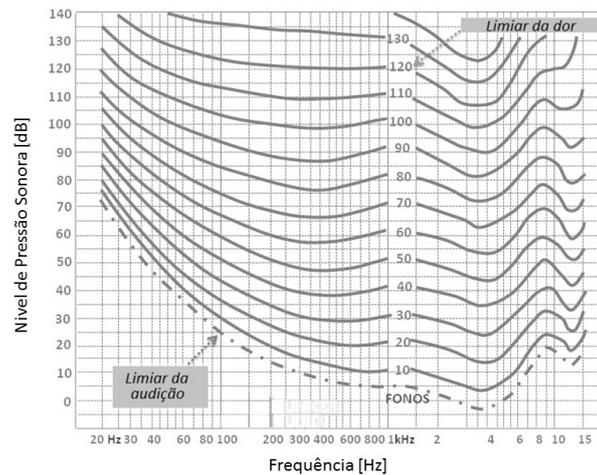


Figura 2.2: Curvas isofônicas [4,9].

As curvas isofônicas são normalizadas pela *International Organization for Standardization* conforme a norma ISO 226.

Devido à diferença de percepção sonora do ouvido humano em função da frequência, os medidores de pressão sonora incluem filtros de ponderação que, uma vez selecionados, aplicam ao sinal de entrada funções de transferência baseadas nas curvas isofônicas. Assim, é possível obter um sinal de saída que melhor se correlaciona com o nível de audibilidade.

Os filtros ponderadores são do tipo *A*, *B*, *C* e *D*, visíveis na figura 2.3. O filtro mais utilizado na medição de ruído é o do tipo *A*, uma vez que representa de forma muito aproximada a sensibilidade do ouvido humano às várias frequências [10]. Logo, este tipo de filtro é o mais recomendado pela maioria das normas e legislações relativas à medição do ruído. É também recomendado que, para a medição de níveis sonoros elevados, seja utilizado o filtro tipo *C*, pois apresenta uma função transferência quase plana [4].

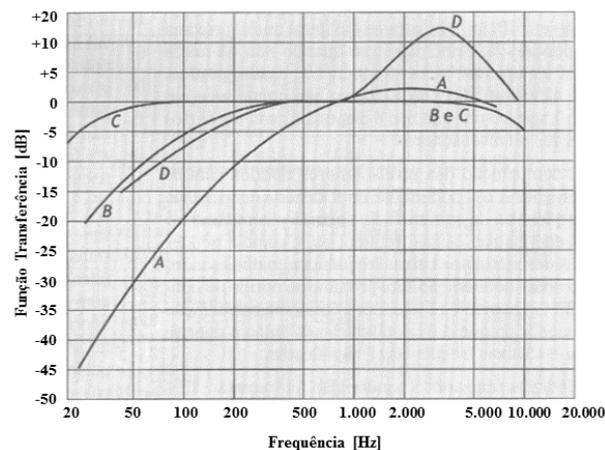


Figura 2.3: Filtros de ponderação [4].

## 2.2 Grandezas acústicas

No estudo da acústica é usual lidar com as seguintes grandezas: intensidade sonora, pressão sonora e potência sonora. É comum expressar essas grandezas acústicas na escala decibel (dB) para uma melhor adequação e facilidade de interpretação do sinal acústico.

### Intensidade sonora

A intensidade sonora,  $I$ , é uma grandeza vetorial definida pela quantidade média de energia que atravessa uma área, de valor unitário, perpendicular à direção de propagação. Como a energia por unidade de tempo é uma potência (watt), a unidade desta grandeza é  $\text{W}/\text{m}^2$ .

A intensidade sonora para ondas com propagação do tipo esféricas progressivas, um tipo de propagação que será explorado na secção 2.3, é dado por [4]:

$$I = \frac{(A/r)^2}{2\rho c}, \quad (2.1)$$

onde,  $A$  é a amplitude da pressão sonora e  $r$  a distância à fonte emissora. O  $\rho c$  é considerado a impedância do meio de propagação, a qual depende da densidade e da velocidade de propagação do meio. Para uma temperatura de 20 °C,  $\rho$  toma o valor de 1,2  $\text{kg}/\text{m}^3$  e  $c$  o valor de 340  $\text{m}/\text{s}$ , aproximadamente.

O nível de intensidade sonora,  $L_I$ , expresso em dB, é definido como [4]:

$$L_I = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right), \quad (2.2)$$

onde  $I_0$  é a intensidade sonora de referência e toma o valor de  $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$  [11].

### Pressão sonora

A pressão sonora,  $p$ , para a propagação do tipo esférica da onda sonora é definida pela equação:

$$p(r, t) = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kr + \phi), \quad (2.3)$$

onde,  $\omega$  é a frequência angular do som,  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda,  $k = 2\pi/\lambda$  é o número de ondas angular e  $\phi$  corresponde à fase da onda num dado ponto entre dois instantes distintos. O sinal negativo no  $kr$  deve-se ao facto da propagação do tipo esférica das ondas sonoras serem no sentido crescente de  $r$ .

O nível de pressão sonora,  $L_p$ , permite caracterizar a sensação subjetiva da intensidade dos sons. Por consequente, o valor de  $L_p$  também depende da distância. Este valor expresso em dB, é definido por [12]:

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right), \quad (2.4)$$

onde  $p$  é o valor eficaz da pressão sonora medida,  $p_0$  é a pressão sonora de referência que toma o valor de  $20 \mu\text{Pa}$  [12], valor este que corresponde ao limiar de audição do ouvido humano. Assim sendo, o nível de pressão sonora é compreendido numa escala onde  $20 \mu\text{Pa}$  corresponde a  $0 \text{ dB}$  e os  $200 \text{ Pa}$  a  $140 \text{ dB}$ , valor este acima do limiar da dor [4].

Normalmente esta grandeza é medida utilizando os filtros de ponderação do tipo  $A$  e tipo  $C$ , sendo representadas com a nomenclatura  $L_{p\_A}$  e  $L_{p\_C}$  [4].

### Nível sonoro contínuo equivalente

O nível sonoro contínuo equivalente,  $L_{eq}$ , é o nível médio da pressão sonora durante o tempo da medição,  $T = t_2 - t_1$ . O  $L_{eq}$  é uma grandeza importante no estudo da exposição ao ruído sendo expressa em dB ou dB(A) quando selecionado o filtro ponderador do tipo  $A$  para a realização da medição. O nível sonoro equivalente é expresso como [4]:

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left[ \frac{p(t)}{p_0} \right]^2 dt \right\}. \quad (2.5)$$

### Potência sonora

A potência sonora de uma onda, expressa em watt, é dada pela equação 2.6:

$$W_p = I \times S, \quad (2.6)$$

onde  $S$  corresponde à área dada em  $\text{m}^2$ . Quando a propagação da onda sonora é considerada do tipo esférica, o  $S$  toma o valor  $4\pi r^2$  [11].

Esta grandeza, expressa em dB, é denominada por nível de potência sonora,  $L_w$ , [12], e é dada por:

$$L_w = 10 \log_{10} \left( \frac{W_p}{W_0} \right), \quad (2.7)$$

onde  $W_0$  corresponde à potência de referência considerada igual a  $10^{-12} \text{ W}$ .

O nível de potência sonora não deve ser confundido com o nível de pressão sonora, pois o nível

de potência sonora é independente do meio ambiente em que o ruído se propaga, ao passo que o valor do nível de pressão sonora sofre alterações com a distância à fonte emissora e também com as características acústicas do meio ambiente [4].

## 2.3 Propagação da onda sonora

A propagação das ondas sonoras pode ser do tipo plana ou esférica. Dado que a propagação, da onda sonora esférica é a mais representativa no quotidiano, onde se enquadram as máquinas elétricas, será esta a ser explorada neste documento. A equação 2.3 mostra a propagação de uma onda sonora esférica, expressa em Pa [4].

O som, ao propagar-se no ar livre sofre uma atenuação no seu nível sonoro à medida que se distancia da fonte emissora. Esta atenuação provém de fatores que influenciam a propagação da onda sonora, tais como [4, 13]:

- Tipo de propagação da onda sonora (plana ou esférica);
- Distância;
- Absorção atmosférica;
- Vento e temperatura;
- Barreiras;
- Absorção e reflexões;
- Humidade e precipitação.

Como só se vai abordar a propagação do tipo esférica das ondas sonoras, o nível de pressão sonora à distância  $r$ , ao ar livre, é definido como [13]:

$$L_p = L_w - 20 \log_{10}(r) - 8 \text{ dB}. \quad (2.8)$$

De acordo com a figura 2.4 e a eq. 2.1, de cada vez que se duplica a distância à fonte sonora a área da esfera aumenta quatro vezes diminuindo assim, a intensidade sonora na mesma proporção, provocando uma atenuação de 6 dB no  $L_p$  [14]. Este resultado é conhecido com a lei do inverso do quadrado da distância.

Durante a propagação da onda sonora ocorre uma atenuação do som por influência do ar atmosférico. Essa atenuação provém de dois processos. O primeiro relaciona a energia que é extraída por condução de calor e pelo atrito viscoso entre as moléculas do ar, e o segundo deve-se à relaxação térmica molecular. A relaxação térmica molecular ocorre quando o fluido não se encontra em equilíbrio interno, devido à passagem da onda sonora, o que provoca uma redistribuição de energia da molécula. Esta redistribuição é feita em modo de energia cinética translacional, energia cinética rotacional e energia vibratória [15].

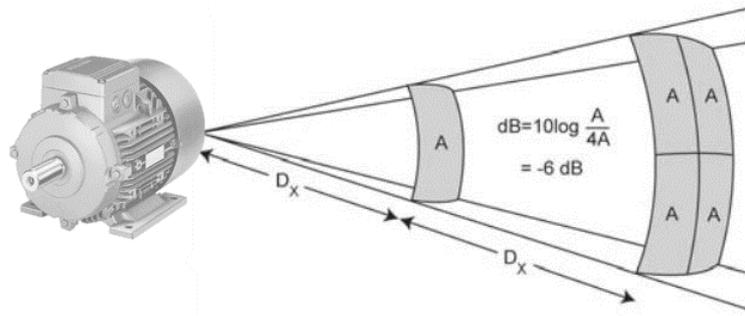


Figura 2.4: Onda de propagação de um motor elétrico ao ar livre.

Os três modos de energia referidos anteriormente, são característicos de um gás poliatômico, como por exemplo o ar atmosférico, que é constituído por oxigénio, hidrogénio e uma pequena parcela de vapor de água e dióxido de carbono. As moléculas de água presentes no ar atmosférico contribuem para a absorção sonora, visto que estas agem como inibidores das colisões moleculares e levam a uma diminuição de transferência de energia cinética translacional e rotacional para energia vibratória [15].

A atenuação do som pelo ar atmosférico é um campo complexo, pois este tipo de perdas é condicionado pela frequência de emissão do ruído, temperatura ambiente, humidade relativa e pressão ambiente [4, 16]. A figura 2.5 relaciona os fatores que mais influenciam a atenuação do som por absorção atmosférica que são a distância à fonte e a frequência do som [13]. É de notar que a atenuação por absorção atmosférica é superior para a gama de média e altas frequências.

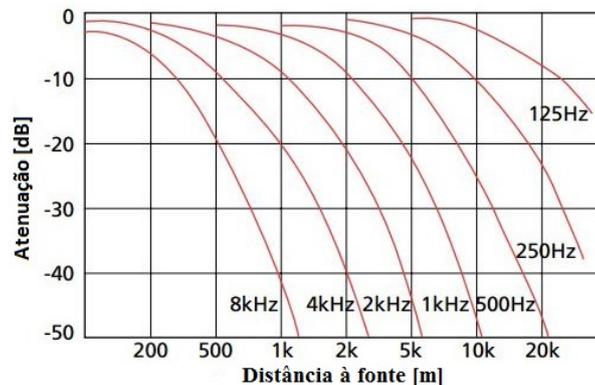


Figura 2.5: Atenuação da onda sonora provocada pela distância à fonte [13].

Para além dos fatores já apresentados, que contribuem para a atenuação do som, o vento, as barreiras, a absorção das superfícies e as reflexões também são fatores que devem ser tidos em consideração.

Para distâncias até 50 metros, a influência do vento na propagação da onda sonora é diminuta. Contudo, para distâncias superiores, o nível sonoro medido pode aumentar alguns  $dB$  se for medido a favor do vento. O valor do incremento no nível sonoro depende da velocidade do vento. Se a medição for feita contra o vento ou perpendicular ao mesmo pode haver uma redução superior a

20 dB, dependendo da velocidade do vento e da distância à fonte. Assim, para uma redução do impacto da distância, as medições devem ser efetuadas com o vento a favor [13].

A figura 2.6 apresenta os valores de atenuação em função da distância e da orientação do aparelho de medida.

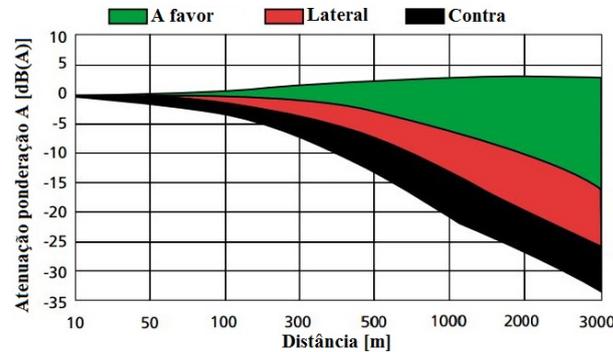


Figura 2.6: Atenuação da onda sonora provocada pelo vento em função à distância [13].

Em suma, a atenuação do som é diretamente proporcional ao quadrado da frequência, inversamente proporcional à temperatura e humidade, ao passo que, a velocidade de propagação do som é diretamente proporcional à temperatura e humidade e não é influenciada pela frequência, se o meio for homogéneo.

A atenuação do som provocada por uma barreira provém da trajetória da onda de propagação e a frequência da mesma. A figura 2.7 apresenta a combinação destes fatores, sendo consideradas duas trajetórias distintas entre o emissor e o recetor do som. O caminho c representa um transmissão direta do som, onde atravessa a barreira imposta, e o caminho a+b corresponde a uma transmissão indireta que contorna a barreira, sendo a+b-c a diferença dos caminhos ilustrado na figura.

A altura da barreira,  $h$ , é outro fator que influencia a atenuação provocada pela utilização de barreiras. No entanto, o som pode não ser totalmente atenuado uma vez que pode haver difração nos bordos superiores e laterais da barreira e apresentar dificuldades em atenuar sons a baixas frequências [13].

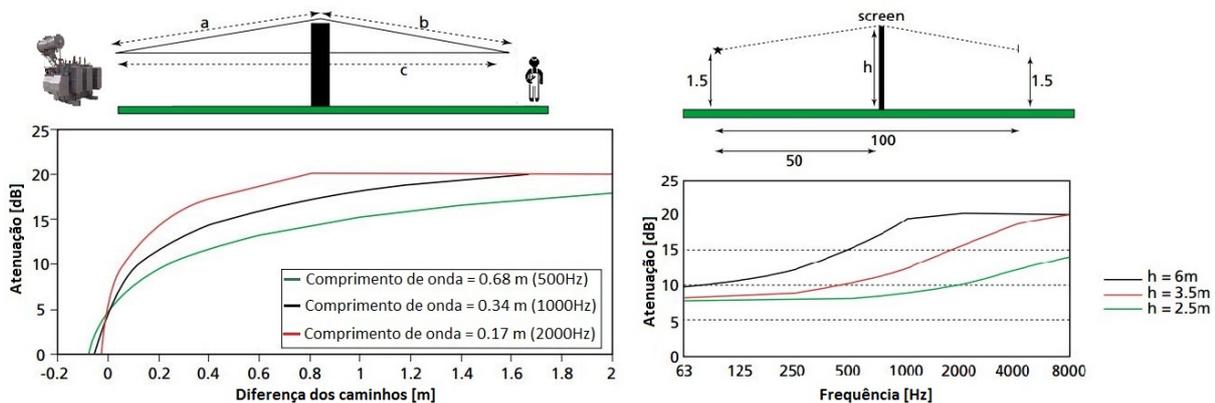


Figura 2.7: Atenuação da onda sonora provocada pela utilização de barreiras.

Na propagação de uma onda sonora num ambiente fechado ou com obstáculos, se este não for anecoico, quando o som incide numa superfície, parte da sua energia incidente é refletida, outra é absorvida pelo material que constitui a superfície e a restante é transmitida. Estas três características são acompanhadas de coeficientes que dependem do tipo de material, espessura e frequência, o que contribui diretamente para a atenuação do som.

Considera-se um ambiente anecoico uma sala projetada para conter as reflexões, tanto das ondas sonoras como das eletromagnéticas emitidas pela fonte sonora presente na sala. Este tipo de sala também é isolado ao ambiente circundante com o intuito de impedir a propagação das ondas sonoras externas à sala [17].

Perante um ambiente não anecoico, também designado por sala prática, é comum dividir o campo sonoro em torno da fonte sonora em quatro campos, como pode ser verificado na figura 2.8.

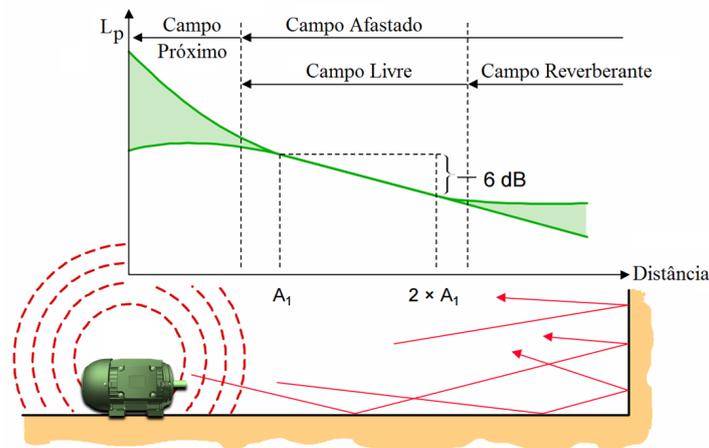


Figura 2.8: Variação do nível sonoro numa sala prática em função da distância à fonte [4].

O campo próximo é a região adjacente à fonte sonora, onde o nível de pressão sonora varia significativamente com uma ligeira variação da posição do microfone. Medições nessa área devem ser evitadas. Esta região estende-se desde a fonte emissora até uma distância dada pelo maior valor entre duas quantidades: metade do comprimento de onda da menor frequência emitida; ou o dobro do valor da maior dimensão da fonte emissora.

O campo afastado é dividido em campo livre e campo reverberante. No campo livre, o som comporta-se do mesmo modo que no ar livre, isto é, sem qualquer superfície refletora a interferir na propagação, ao passo que no campo reverberante, as múltiplas reflexões das paredes ou objetos são tão importantes como o som emitido pela fonte [4, 5].



# Capítulo 3

## Ruído acústico emitido por motores de indução e acionamentos elétricos

### 3.1 Ruído acústico emitido por motores de indução

No estudo da acústica é necessário conhecer os elementos constituintes da fonte emissora. Os elementos constituintes do motor de indução trifásico encontram-se ilustrados na figura 3.1. Os números indicados na figura 3.1(a) localizam os seguintes elementos: 1) alhetas, 2) anéis terminais da gaiola, 3) barras do circuito magnético, 4) enrolamentos do estator, 5) material ferromagnético do estator, 6) rolamentos, 7) ventilador, 8) veio e 9) carcaça. A figura 3.1(b) ilustra um corte transversal do motor de indução trifásico.

As fontes de ruído sonoro no motor indução trifásico vão estar relacionadas com os elementos identificados na figura 3.1, e a origem destas pode ser de natureza aerodinâmica, eletromagnética e mecânica [18]. A propagação do som proveniente das diferentes fontes de ruído dá-se em dois modos: transmitido através da estrutura do motor e transmitido através do ar na envoltória do motor (ruído aéreo), como está ilustrado na figura 3.2 [19–21].

O ruído transmitido pela estrutura tem origem na vibração dos objetos sólidos que constituem

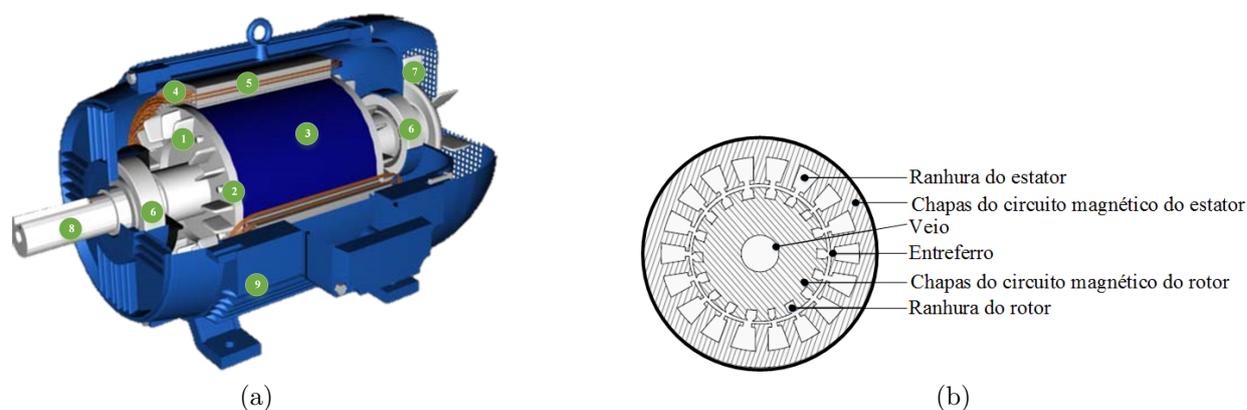


Figura 3.1: Motor de indução trifásico aberto e corte transversal: (a) motor aberto; (b) corte transversal do motor.

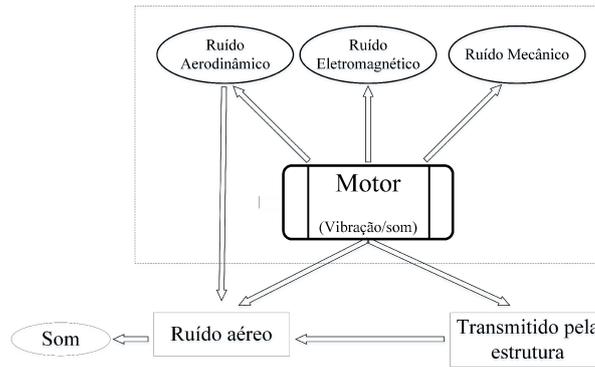


Figura 3.2: Fontes de ruído e modos de propagação do som.

o motor de indução trifásico, ao passo que o ruído aéreo é causado pelo movimento de grandes volumes de ar e pela superfície do motor de indução trifásico [19, 20].

O ruído de origem aerodinâmica provém da interação dos elementos fixos e rotativos do motor de indução trifásico com o fluxo de ar que passa pelo mesmo [22]. Esta deslocação de ar surge devido aos elementos de ventilação internos e externos que compõem o sistema de refrigeração do motor de indução trifásico.

Nas extremidades do rotor encontram-se alhetas de ventilação (figura 3.1(b)). O fluxo de ar produzido pela rotação das alhetas permite a refrigeração das testas das bobinas dos enrolamentos do estator e o rotor. Estas alhetas podem também ser designadas por elemento de ventilação interno [22].

No entanto, muitos motores de indução trifásicos requerem um elevado fluxo de ar para arrefecerem devidamente, sendo por isso necessário recorrer a uma ventilação adicional garantida por ventiladores externos montados diretamente no veio do motor. O formato das pás destes ventiladores externos pode ser do tipo radial ou centrífugo, como é ilustrado na figura 3.3. A deslocação do ar pode ser produzida pelo movimento das pás que dá origem a ruído acústico, sendo que a pá do tipo centrífugo emite menos ruído acústico devido ao facto do seu desenho permitir uma maior eficiência aerodinâmica [12].

Os motores de indução trifásicos utilizados nesta dissertação possuem um ventilador externo

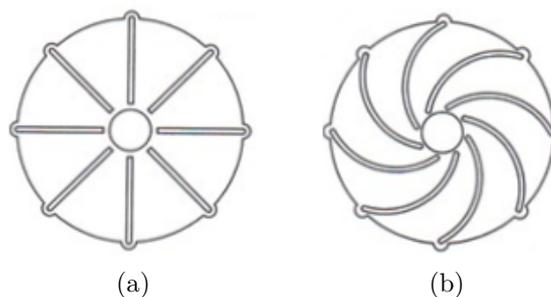


Figura 3.3: Tipos de pá do ventilador: (a) pá do tipo radial; (b) pá do tipo centrífuga.

com pás do tipo radial. A frequência fundamental característica,  $f_p$ , deste tipo de ruído acústico é dada pela (3.1), onde  $n_m$  é a velocidade do veio do motor, expressa em rpm [22, 23].

$$f_p = \frac{n^\circ \text{ de pás do ventilador}}{60} \times n_m. \quad (3.1)$$

Assim sendo, a principal fonte de ruído aerodinâmico no motor de indução trifásico, resulta da interação entre as pás do ventilador com o ar que as circunda.

Nos motores de indução trifásicos existem, para o termo fundamental, diversos harmônicos no campo magnético do entreferro. As principais causas destes harmônicos são [24]:

1. Harmônicos espaciais da força magnetomotriz devido à distribuição não sinusoidal dos enrolamentos do estator e rotor;
2. Existência de harmônicos no entreferro devido à variação da permeância do próprio, que depende:
  - do número de ranhuras do estator e do rotor;
  - geometria das ranhuras e dentes do estator e rotor;
  - saturação do núcleo ferromagnético;
3. Componentes harmônicas das correntes que percorrem os enrolamentos do estator.

Estes harmônicos vão dar origem a vibrações e ruído de natureza eletromagnética. Se a frequência de ressonância do material ferromagnético do estator coincidir com a frequência de algum harmônico das forças magnetomotrizes, surge o fenômeno de ressonância, que por sua vez irá incrementar o nível de ruído emitido pelo motor de indução trifásico [25, 26].

A relação entre o número de ranhuras do estator e do rotor é a maior responsável pela produção de um elevado ruído de natureza eletromagnética nos motores de indução trifásicos [26, 27], em que uma relação inadequada vai originar uma enorme vibração e por conseguinte ruído acústico. A distribuição das linhas de fluxo ao longo do entreferro não é uniforme, como é visível na figura 3.4, e esta resulta do produto entre a permeabilidade magnética do material do entreferro (ar) e a distribuição da força magnetomotriz ao longo do mesmo [27].

Por conseguinte, vão existir dois tipos de forças no interior do motor de indução trifásico: forças do tipo tangencial e do tipo radial. Tais forças vão ser exercidas no material ferromagnético e dentes do estator [26].

As forças do tipo radial são as principais responsáveis pelo o ruído de natureza eletromagnética, sendo esta máxima quando a variação do fluxo é elevada e isso ocorre quando as ranhuras do rotor estão alinhadas com os dentes do estator. Com o aumento de carga no motor, as correntes induzidas no rotor aumentam. Estas vão criar um campo magnético mais forte, o que leva a que as forças do tipo radial e tangencial sejam mais significativas [22, 26].

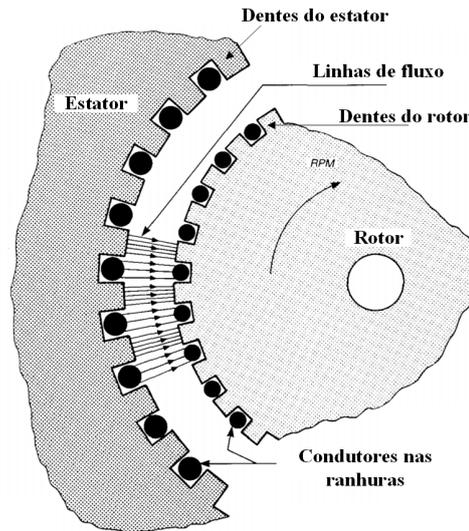


Figura 3.4: Distribuição não uniforme da densidade de fluxo [28].

A distribuição das forças radial e tangencial ao longo da circunferência do estator ocorre de uma forma não uniforme. Esta falta de uniformidade leva a que a distribuição espacial das ondas de força sobre o estator crie diferentes modos de vibração. A figura 3.5(a) ilustra estes modos de vibração e o seu valor,  $m$ , é obtido através da equação [22]:

$$m = (N_s - N_r) \pm Q \times 2P, \quad (3.2)$$

onde  $N_s$  é o número de ranhuras do estator,  $N_r$  é o número de ranhuras do rotor,  $P$  é o número de pares de polos e  $Q = 0, 1, 2$ , etc.

Se a frequência das ondas de força coincidir com a frequência de ressonância do material ferromagnético do estator, irá surgir um elevado ruído de origem eletromagnética [22]. A probabilidade de ocorrência deste fenómeno para baixos valores de modos de vibração é superior relativamente a modos de vibração de valor mais elevado [26], em que o caso mais crítico, tanto a nível da deformação do estator como da produção de ruído acústico, ocorre quando  $m = 2$  [12].

De forma a compreender a influência do modo de vibração na frequência de ressonância, o material ferromagnético é considerado uma peça sólida unida pelas extremidades, que sob a ação das forças, tende a sofrer uma deflexão [26]. Este fenómeno está ilustrado na figura 3.5(b).

A frequência de ressonância do material ferromagnético, em função do modo de vibração aplicado, provém da teoria da elasticidade e é expressa como [22, 26]:

$$f_0 = \frac{36700 \ m(m^2-1) \ H}{39.37(D-H)^2 \sqrt{G(m^2+1)}}, \quad (3.3)$$

$$G = \frac{\text{peso do conjunto do material ferromagnético e dentes}}{\text{peso do material ferromagnético}},$$

onde  $f_0$  é a frequência de ressonância do material ferromagnético (expresso em Hz),  $H$  é a pro-

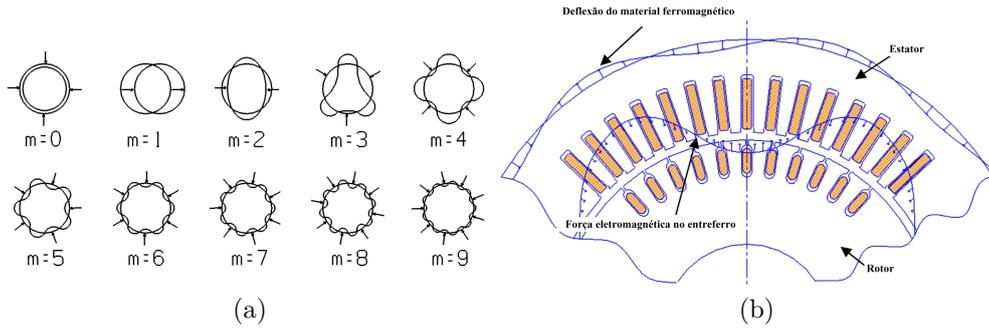


Figura 3.5: (a) Modos de vibração; (b) deflexão do material ferromagnético do estator.

fundidade do material ferromagnético do estator descontando a espessura da ranhura (expresso em  $m$ ),  $D$  o diâmetro da parte externa do estator (expresso em  $m$ ) e  $G$  a razão entre o pesos (expresso em  $kg$ ).

Outros fatores que contribuem para a produção de vibração, e por sua vez de ruído acústico com origem eletromagnética, são as barras fraturadas no rotor e as excentricidades dos elementos rotativos [2, 25]. As frequências características associadas a avarias nas barras do rotor,  $f_{brb}$ , são dadas por (3.4), onde  $s$  é o deslizamento do motor de indução.

$$f_{brb} = \left[ \frac{Q(1-s)}{P} \pm s \right] f_s. \quad (3.4)$$

Um motor durante a fase de concepção pode conter uma excentricidade limite de 10%. A excentricidade, que pode ser do tipo estática, dinâmica e mista, vai dar origem a uma força magnética desequilibrada, originando vibrações e ruído acústico [29]. A figura 3.6 ilustra os tipos de excentricidade. A excentricidade do tipo estática ocorre quando o centro de rotação é concêntrico com o eixo do rotor mas não com o centro geométrico do estator, ao passo que a excentricidade do tipo dinâmica ocorre quando o centro de rotação não é coincidente com o centro do rotor [30]. A excentricidade mista ocorre quando se verifica os dois tipos de excentricidade anteriormente mencionados.

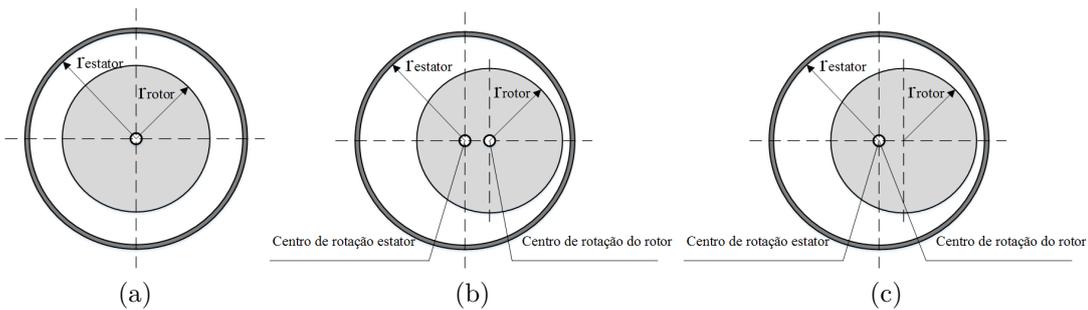


Figura 3.6: Tipos de excentricidades: (a) rotor concêntrico com o estator; (b) excentricidade estática; (c) excentricidade dinâmica.

As equações (3.5) e (3.6) caracterizam os valores das frequências de vibração do motor de indução trifásico para uma excentricidade do tipo estática,  $f_{asyst}$ , e do tipo dinâmica,  $f_{asydy}$ , respetivamente [31].

$$f_{asyst} = Qf_s, \quad (3.5)$$

$$f_{asydy} = \begin{cases} 2f_s \pm f_r \\ f_r \\ 2f_r \\ 2(f_s \pm f_r) \end{cases} \quad (3.6)$$

onde  $f_r$  é a frequência mecânica de rotação do rotor expressa em Hz.

As excentricidades, para além de originarem ruído de natureza eletromagnética, são também responsáveis pela criação de ruído de natureza mecânica. Este surge devido ao movimento rotacional do rotor e dos elementos montados no seu veio. As excentricidades também podem estar acompanhadas de folgas, consequência de parafusos mal apertados ou da má aplicação dos elementos sobre o veio em rotação. Se ambas as causas não forem corrigidas originam vibrações na estrutura, sendo a frequência desta vibração,  $f_{exc+folga}$ , dada por [32]:

$$f_{exc+folga} = Qf_r. \quad (3.7)$$

As excentricidades, em situações extremas, podem originar deflexões no veio, podendo conduzir ao contacto entre o rotor em movimento e o estator bem como a um desgaste excessivo dos rolamentos [30]. O desalinhamento do veio do motor também pode provir de uma incorreta montagem entre o motor de indução trifásico e a carga ou da expansão térmica do material entre estes. As frequências de vibração características para um desalinhamento no eixo,  $f_{eixo}$ , e para a velocidade mecânica do veio,  $f_{vel}$ , são dadas por [19, 32, 33]:

$$f_{eixo} = 2f_r, \quad (3.8)$$

$$f_{vel} = f_r. \quad (3.9)$$

Cerca de 40-50% das avarias num motor ocorrem nos rolamentos [34]. As avarias nas diferentes partes do rolamento derivam do atrito entre as superfícies, dos problemas de alinhamento entre o motor e a carga, da corrosão da superfície do rolamento, da contaminação, da falta de lubrificação nas esferas e da introdução excessiva de carga axial ou radial. Estas avarias vão estar na origem de vibrações e ruídos indesejados [35, 36].

O ruído dos rolamentos depende do tipo de rolamento e do seu controlo de qualidade na fase de fabrico [37]. Os rolamentos mais utilizados na indústria são do tipo deslizante ou de esferas [38], ilustrados na figura 3.7.

O rolamento deslizante, ilustrado na figura 3.7(a), produz um ruído inferior comparativamente com o rolamento de esferas [39]. A vibração produzida por este tipo de rolamento depende da rugosidade das superfícies deslizantes, lubrificação e estabilidade de rotação do fluxo de óleo no rolamento imposta durante o processo de fabrico e montagem do mesmo.

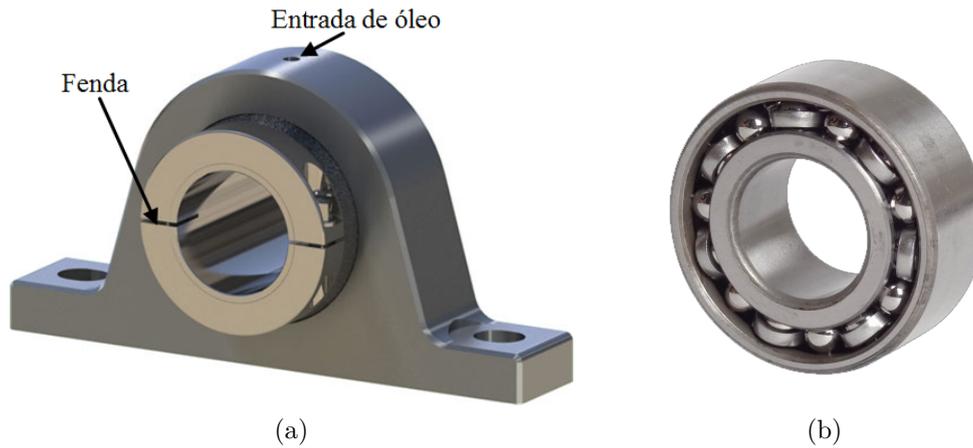


Figura 3.7: Tipos de rolamentos: (a) rolamento deslizante; (b) rolamento de esferas.

O rolamento de esferas, ilustrado na figura 3.7(b), é constituído por um anel externo, um anel interno, esferas e uma gaiola para alojar as mesmas, como é visível na figura 3.8. Se algum destes componentes apresentar uma irregularidade, dá-se a produção de uma frequência característica que depende da velocidade de rotação do veio e das dimensões do rolamento [12,32]. Essas frequências são determinadas pelas equações (3.10) - (3.13), [40].

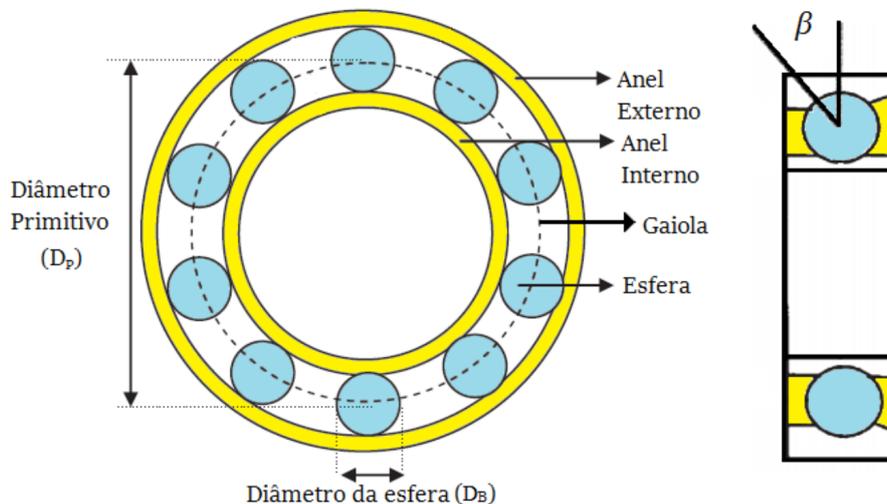


Figura 3.8: Componentes de um rolamento de esferas [41].

$$f_{int} = \frac{N_B}{2} f_r \left( 1 + \frac{D_B}{D_p} \cos \beta \right) \quad (3.10)$$

$$f_{ext} = \frac{N_B}{2} f_r \left( 1 - \frac{D_B}{D_p} \cos \beta \right) \quad (3.11)$$

$$f_B = \frac{D_p}{D_B} f_r \left[ 1 - \left( \frac{D_B}{D_p} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

$$f_{gaiola} = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{D_B}{D_p} \cos \beta \right), \quad (3.13)$$

onde:

$f_{int}$  - frequência característica do anel interno (Hz);

$f_{ext}$  - frequência característica do anel externo (Hz);

$f_B$  - frequência característica das esferas (Hz);

$f_{gaiola}$  - frequência característica da gaiola (Hz);

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

$N_B$  - número de esferas;

$D_B$  - diâmetro das esferas (mm);

$D_p$  - diâmetro primitivo do rolamento (mm);

$\beta$  - ângulo de contacto (graus), habitualmente toma valor nulo.

Se não houver um conhecimento prévio das dimensões do rolamento em análise, podem ser utilizadas as equações (3.14) e (3.15) para a obtenção das frequências características do anel interno e anel externo, respetivamente. Estas equações são válidas para rolamentos com 6 a 12 esferas [42, 43].

$$f_{int} = 0.6 N_B f_r, \quad (3.14)$$

$$f_{ext} = 0.4 N_B f_r. \quad (3.15)$$

Tendo em conta (3.14) e a (3.15), as frequências características associadas à vibração da carcaça do motor, provenientes de uma anomalia no anel interno,  $f_{vint}$ , e externo,  $f_{vext}$ , são obtidas através das expressões [41, 42]:

$$f_{vint} = \pm f_{int} \pm x f_r, \quad (3.16)$$

$$f_{vert} = Qf_{ext}, \quad (3.17)$$

onde  $x = 0, 1, 2$ , etc.

O acoplar de uma carga a um motor pode originar vibrações e ruído provenientes da mesma, figura 3.9, incrementando o ruído de natureza mecânica e eletromagnética. Este conjunto de vibrações e ruído pode surgir por um mau acoplamento entre o motor e a carga, desgastando os rolamentos [37], ou por um aumento das correntes que percorrem os enrolamentos do estator e do rotor e isto provoca um aumento proporcional das ondas de força magnetomotriz [44].

Por último, a fonte de ruído predominante em motores de indução trifásicos, de 2 a 4 polos é a de origem aerodinâmica, enquanto que para motores com 6 ou mais polos predomina o ruído de origem eletromagnética. Isto explica-se pelo facto de a velocidade de rotação nominal diminuir com o aumento do número de polos diminuindo dessa forma o ruído de origem aerodinâmica. No entanto, com o aumento do número de polos do motor de indução trifásico, a espessura do material magnético estatórico diminui, tornando mais fácil a deformação do núcleo do estator, originando um aumento do ruído eletromagnético [12, 45].

Relativamente ao nível de carga dos motores de indução trifásicos, quando a fonte de ruído predominante for a de ventilação, como nos casos dos motores de 2 e 4 polos, o motor tende a ser mais silencioso com o aumento do regime de carga. Por outro lado, nos motores com 6 ou mais polos, o incremento de carga provoca um aumento do ruído eletromagnético [12]. No anexo A são caracterizados os limites de ruído para as máquinas elétricas rotativas, definidos pela IEC 60034-9 (2003).

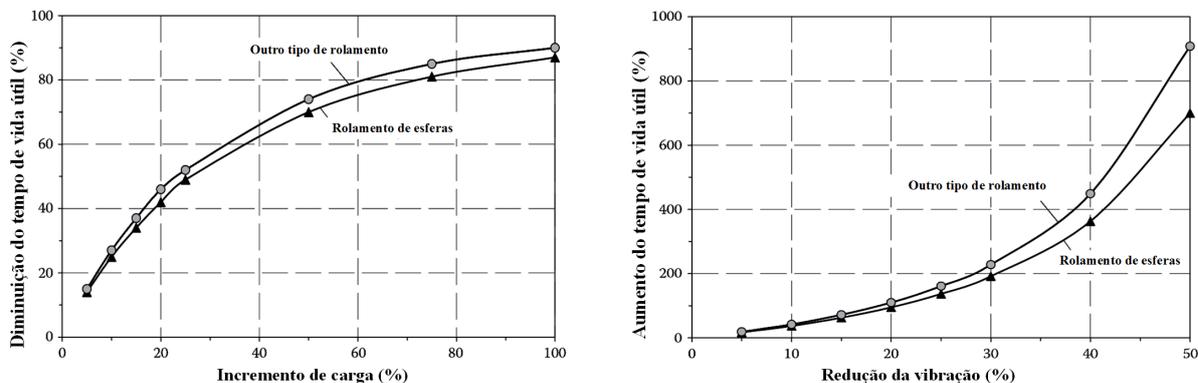


Figura 3.9: Impacto do incremento de carga e redução da vibração no tempo de vida útil do rolamento [32].

### 3.2 Variadores eletrônicos de velocidade

A maioria dos motores são projetados para operar à velocidade nominal mas, na indústria, muitas aplicações têm a necessidade de operar a uma velocidade diferente da nominal. Esta variação de velocidade é conseguida através do uso do variadores eletrônicos de velocidade também designados por conversores de frequência. Estes equipamentos são colocados entre a rede e o motor a controlar. A aplicação destes equipamentos na indústria tem vindo a aumentar, uma vez que, apresentam um bom rendimento e um bom desempenho [46].

O variador eletrónico de velocidade é constituído por três estágios: estágio da retificação, estágio de filtragem e o estágio da inversão. No primeiro estágio que corresponde à retificação, é usado normalmente uma ponte retificadora trifásica a díodos ou no caso de sistemas de maior potência em que se pretende que os mesmos tenham uma capacidade de regeneração de energia para a rede é utilizado um retificador ativo baseado transístores bipolares. O estágio de filtragem é normalmente constituído por uma bobina em série entre o retificador e o inversor e um condensador de filtragem ligado em paralelo entre os dois terminais do barramento DC. O estágio do inversor, constituído usualmente em transístores bipolares, gera a onda de tensão que será aplicada ao motor. A figura 3.10 ilustra os três estágios do variador eletrónico de velocidade.

Existem diferentes estratégias de controlo de velocidade destes variadores eletrónicos de velocidade, sendo as mais usuais: o controlo escalar, o controlo por orientação do campo rotórico (FOC) e o controlo direto de binário (DTC). Neste domínio cada fabricante opta pela sua tecnologia sendo que no caso deste trabalho foi utilizado um variador de velocidade industrial da ABB baseado no controlo escalar e seguidamente foi utilizado uma plataforma de controlo digital em que estão implementadas as estratégias de controlo FOC e DTC [47, 48].

Quando os motores de indução trifásicos são alimentados por VEVs, ruído acústico emitido tende a aumentar entre 2 a 7dB(A) para frequências de comutação superiores a 700 Hz [12]. Como



Figura 3.10: Esquema de montagem e princípio de funcionamento de um variador eletrônico de velocidade.

as tensões de saída do inversor são não sinusoidais, há um conjunto de harmônicos que presentes no sistema de alimentação do motor e que dão origem a vibrações adicionais, podendo ser perceptíveis ao ouvido humano [47, 49].

A utilização de variadores eletrônicos de velocidade aumenta o ruído de origem eletromagnética, devido ao aparecimento de harmônicos temporais, para além dos harmônicos espaciais que já existiam quando o motor é alimentado diretamente da rede. Estes harmônicos temporais introduzidos na alimentação do motor dependem da estratégia de modulação usada, do índice de modulação, da frequência de comutação e da própria estratégia de controlo [50], uma vez que, para sistemas com controlo FOC utiliza-se tipicamente uma modulação do vetor espacial ao passo que, para sistemas com controlo DTC é utilizado uma tabela de comutações, e portanto a frequência de comutação do inversor vai ser variável no tempo, não havendo assim componentes espectrais bem definidas para este tipo de controlo.

Com a utilização destes equipamentos o valor escolhido para a frequência de comutação irá se refletir a nível acústico. Se por exemplo a frequência de comutação for de 4 kHz irão surgir bandas laterais em torno desta e harmônicos a 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e assim sucessivamente. Assim sendo, o método preferido para reduzir o ruído proveniente da utilização deste tipo de equipamento na alimentação do motor, é o aumento do valor da frequência de comutação. Essa redução de ruído surge devido à deslocação das bandas laterais em torno de  $f_c$  e dos harmônicos para uma região não audível [47]. Contudo, este método leva a que o variador de velocidade tenha maiores perdas por comutação e problemas de compatibilidade eletromagnética [51, 52].

A figura 3.11 ilustra o espectro da pressão sonora relativo às componentes espectrais que irão surgir em torno de  $f_c$  e em torno dos seus harmônicos, devido à utilização do variador eletrónico de velocidade. As componentes espectrais de maior amplitude surgem às frequências de  $f_c \pm 3f_s$  e  $f_c \pm f_s$  [50].

Vão ainda surgir outras componentes espectrais em torno da frequência de comutação e dos seus harmônicos. Tendo em mente [51], estão são expostas em dois grupos: o grupo dos harmônicos

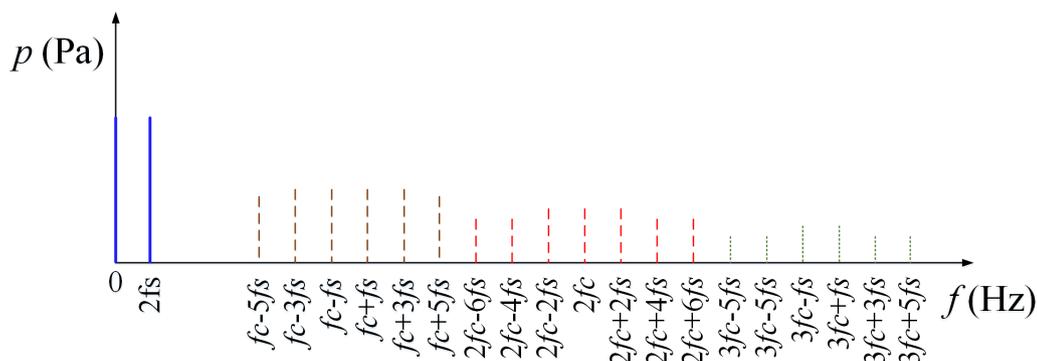


Figura 3.11: Espectro da pressão sonora relativo às componentes espectrais em torno de  $f_c$  e dos seus harmônicos. Adaptado de [50].

em torno de  $f_c$  ímpar e o grupo em torno de  $f_c$  par. O valor das componentes espectrais para cada grupo é obtido recorrendo ao conjunto (3.18) e (3.19). A expressão (3.18) corresponde ao grupo dos harmónicos ímpares, ao passo que a expressão (3.19) corresponde ao grupo dos harmónicos pares.

$$(2Q - 1)f_c \quad e \quad (2Q - 1)f_c \pm 2Z \times f_s, \quad (3.18)$$

$$2Q \times f_c \pm (2Z - 1)f_s. \quad (3.19)$$

onde:  $Q$  e  $Z$  são números ínteiros.

# Capítulo 4

## Resultados Experimentais

Neste capítulo serão validados alguns dos conceitos teóricos abordados nos capítulos anteriores. Para esse efeito começa-se por explicar o procedimento de medição de ruído acústico proveniente dos motores de indução trifásicos e de acionamentos elétricos controlados através de diferentes estratégias de controlo.

De seguida, são apresentados os resultados obtidos para os diferentes tipos de avaria estudados e os resultados obtidos para as diferentes estratégias de controlo, utilizadas nesta dissertação.

### 4.1 Equipamento e procedimento utilizado para aquisição do som

O equipamento utilizado nos ensaios experimentais foi o medidor de pressão sonora ou sonómetro 2250 Light da Brüel & Kjær com um microfone 4950 - 1/2 polegada pré-polarizado em campo livre, com sensibilidade equivalente a 44.2 mV/Pa. As principais especificações destes equipamentos são descritas na tabela 4.1.

Ambos os equipamentos anteriormente mencionados foram montados num tripé e colocados a uma distância de 0.9 m dos motores de indução objeto de análise. A escolha desta distância teve por base o valor da maior dimensão dos motores, que corresponde a cerca de 0.32 m. Uma vez

Tabela 4.1: Especificações do sonómetro e microfone utilizados nos ensaios experimentais.

Equipamento	Características	
	Fabricante	Brüel & Kjær
	Modelo	2250 Light
	Classe do sonómetro	Classe 1
	Fabricante	Brüel & Kjær
	Modelo	4950 Pré-polarizado em campo livre
	Condensador (pF)	13.3
	Diâmetro (m)	0.0127
	Sensibilidade (mV/pA)	44.2

que 0.9 m é um valor superior ao dobro do valor 0.32 m, garante-se que as medições efetuadas pelo sistema de aquisição de som ocorrem na zona de campo livre. A disposição aqui descrita encontra-se ilustrada na figura 4.1, e foi aplicada nas diferentes medições realizadas ao longo desta dissertação.

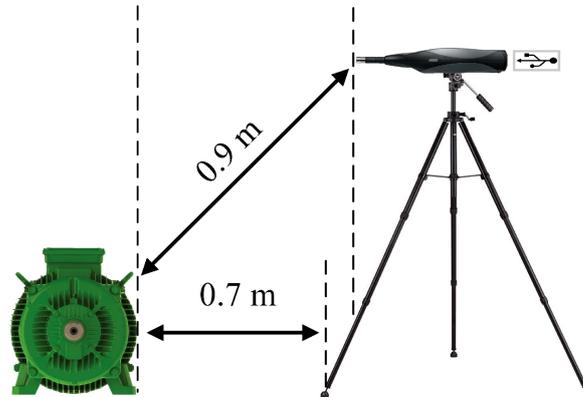


Figura 4.1: Disposição do sistema de aquisição do sinal sonoro.

Relativamente à captação do sinal sonoro emitido pelos motores de indução trifásicos objeto de estudo, este é conseguido pelo conjunto sonómetro mais microfone, e os dados obtidos são gravados num ficheiro de som do tipo *.wav*, com uma resolução de 16 bits. O formato *.wav*, ao invés de outros tipos de ficheiro de som (*mp3*, *wma*, ...), garante que toda a gama de frequências emitidas pela fonte sonora é gravada. Este sinal sonoro é captado sem qualquer tipo de filtragem.

O período de aquisição para cada ensaio foi de 30 segundos, com uma frequência de amostragem de 48 kHz e uma resolução espectral de 0.03 Hz. O sinal sonoro adquirido é posteriormente analisado num programa desenvolvido ao longo desta dissertação em ambiente Labview, e a janela espectral utilizada foi a janela de *Hanning*.

Para a identificação, no espectro sonoro, das frequências características relacionadas com os diferentes tipos de avarias, das diferentes estratégias de controlo de acionamentos elétricos, bem como as frequências características associadas aos aspetos construtivos de cada motor de indução trifásico, é aplicada a *transformada rápida de Fourier* (FFT) ao sinal sonoro adquirido.

## 4.2 Ensaio Realizados

### 4.2.1 Funcionamento normal

#### Motor de indução trifásico alimentado diretamente da rede

De forma a proceder-se a uma análise espectral do sinal sonoro obtido é necessário determinar as frequências características das fontes de ruído sonoro habituais num motor de indução trifásico de origem mecânica, origem aerodinâmica e origem eletromagnética, quando este não possui qualquer

tipo de avaria. Na tabela 4.2 são apresentadas as diferentes causas e as respectivas frequências características para as diferentes fontes de ruído sonoro.

A figura 4.2 apresenta o espectros sonoros obtidos para os distintos regimes de carga, quando o motor de indução trifásico é alimentado diretamente da rede e na situação em que não possui qualquer tipo de avaria, motor saudável. Para o regime de vazio, o espectro sonoro característico está representado na figura 4.2(a), ao passo que a figura 4.2(b) representa o regime de plena carga. Estes espectros irão servir de base comparativa para os espectros sonoros obtidos quando aplicadas as avarias nos rolamentos do motor de indução trifásico. A tabela B.1, do anexo B, apresenta as características do equipamento utilizado neste ensaio.

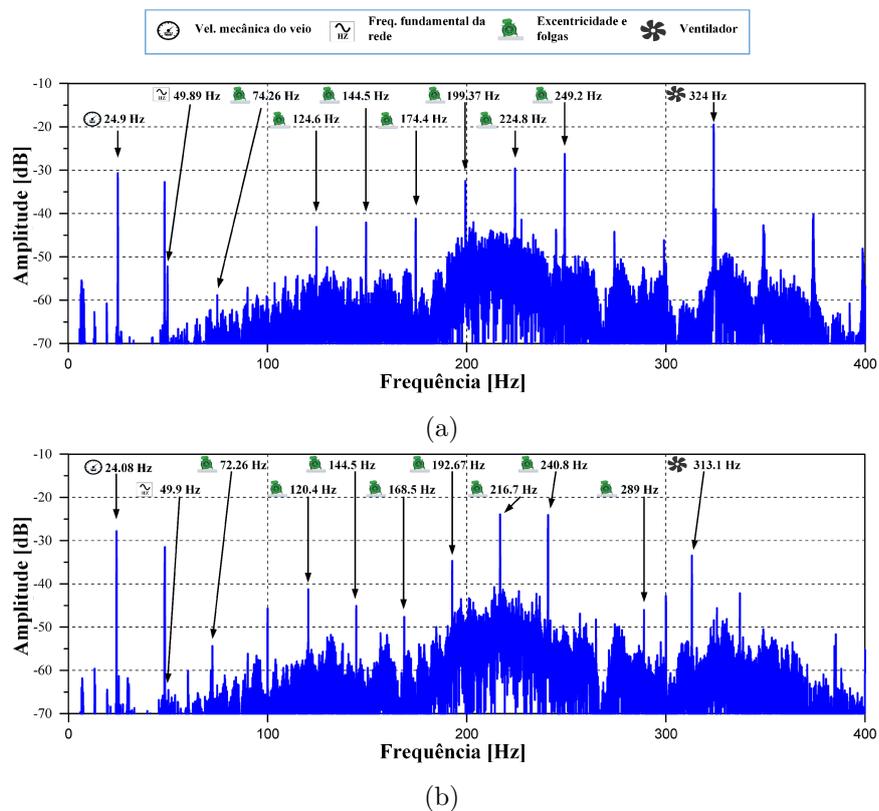


Figura 4.2: Espectros sonoros do motor em boas condições quando alimentado diretamente da rede: (a) regime de vazio; (b) funcionamento à plena carga.

Numa fase primordial é possível identificar um conjunto de frequências características provenientes de diferentes fontes de ruído. Na figura 4.2(a), a primeira frequência identificável provém da rotação do veio/rotor do motor indução trifásico no qual, este veio/rotor, se encontra acoplado mecanicamente ao gerador de corrente contínua. O valor desta frequência característica é obtido através de (3.9) e coincide com a frequência mecânica de rotação do rotor. No caso do regime de funcionamento do motor de indução em vazio, o seu valor corresponde a 24.9 Hz e é referenciada nos espectros sonoros como velocidade mecânica do veio.

Seguidamente, é possível identificar a frequência fundamental imposta pela rede, apresentando um valor de 49.89 Hz. Verificou-se ao longo dos ensaios realizados que esta não possui uma elevada

Tabela 4.2: Causas e frequências características para as diferentes fontes de ruído sonoro num motor de indução trifásico.

Origem	Causa	Frequência [Hz]	Observações
Mecânica	Desalinhamento do eixo	$f_{eixo} = 2fr$	-----
	Rotação do veio	$f_{vel} = fr$	-----
	Excentricidade e folgas	$f_{exc+folga} = Qfr$	Q=1, 2, 3, ...
	Anel interno do rolamento	$f_{int} = 0.6N_B fr,$	-----
		$f_{vint} = \pm f_{int} + xfr$	x=0, 1, 2, ...
	Anel externo do rolamento	$f_{ext} = 0.4N_B fr$	-----
$f_{vext} = Qf_{ext}$		Q=1, 2, 3, ...	
Aerodinâmica	Ventilação	$f_p = n^\circ \text{ de pás do ventilador} \times fr$	-----
Magnético	Forças tangenciais	$f_{tang} = f_s \times N_r \frac{Q}{P}(1-s)$	-----
	Ressonância estator	$m = (N_s - N_r) \pm Q \times 2P$	Q=1, 2, 3, ...
		$f_0 = \frac{36700 m(m^2-1) h}{39.37(D-h)^2 \sqrt{G(m^2+1)}}$	-----
	Avaria nas barras do rotor	$f_{brb} = \left[ \frac{Q(1-s)}{P} \pm s \right] f_s$	Q=1, 2, 3, ...
	Excentricidade estática	$f_{asyst} = Qf_s$	Q=1, 2, 3, ...
	Excentricidade dinâmica	$f_{asydy} = 2f_s \pm fr$	-----
$f_{asydy} = 2fr$		-----	
$f_{asydy} = 2(f_s \pm fr)$		-----	

influência na produção de ruído pois, por vezes, apresenta amplitudes muito baixas. No entanto, à esquerda da frequência fundamental, nota-se uma frequência com uma amplitude considerável. Esta surge aos 48.35 Hz e não se conseguiu apurar a causa exata da mesma.

Prosseguindo no espectro sonoro, é possível identificar um conjunto de sete frequências características com origem em excentricidades e folgas. Este conjunto de sete frequências características deve-se à rotação do acoplamento mecânico entre as duas máquinas elétricas e encontram-se presentes em todos os espectros sonoros obtidos. A obtenção dos valores das frequências características é conseguido recorrendo a (3.7), que para o caso representado na figura. 4.2(a), apresenta os valores: 74.26 Hz, 124.6 Hz, 144.5 Hz, 174.4 Hz, 199.37 Hz, 224.8 Hz e 249.2 Hz.

Por último, destaca-se a contribuição que a ventilação tem na produção de ruído sonoro. O valor da sua frequência característica foi obtido utilizando a equação (3.1), e uma vez que o ventilador possui treze pás obtém-se o valor 324 Hz. No espectro sonoro também é possível verificar o aparecimento do segundo harmónico da frequência de ventilação, aos 648 Hz.

Na figura 4.2(b) encontram-se identificadas as frequências características de diferentes origens, para o regime de plena carga. Excetuando a frequência fundamental da rede, os valores das restantes frequências características diferem dos da figura 4.2(a), uma vez que dependem da frequência mecânica de rotação do rotor. A primeira frequência identificável é novamente o valor correspondente à frequência mecânica de rotação do rotor, e apresenta o valor de 24.08 Hz. Novamente à esquerda da componente fundamental da rede, 49.9 Hz, surge uma componente espectral à frequência de 48.35 Hz com a sua amplitude considerável e demonstrando que o valor da frequência desta componente espectral não varia com os distintos regimes de carga.

Relativamente às frequências características associadas às excentricidades e folgas, continua identificável o conjunto de sete frequências, que no regime de plena carga apresentam os seguintes valores: 72.26 Hz, 120.4 Hz, 144.5 Hz, 168.5 Hz, 192.67 Hz, 216.7 Hz e 240.8 Hz. A frequência de ventilação surge aos 313.1 Hz e o seu harmónico aos 626.2 Hz, com uma amplitude menor comparativamente ao regime de carga em vazio. Tal deve-se à imposição de carga ao motor de indução trifásico. É de salientar ainda o aparecimento de uma componente espectral aos 100 Hz. Esta pode advir de uma excentricidade estática dada por (3.5) ou de um desequilíbrio nas correntes de alimentação do motor de indução trifásico.

### **Motor de indução trifásico alimentado por um variador de velocidade industrial**

A figura 4.3 demonstra a influência que o variador de velocidade industrial tem nos espectros sonoros quando comparados com os espectros sonoros obtidos na situação em que o motor de indução trifásico é ligado diretamente da rede. O controlo selecionado no variador de velocidade industrial ABB, ACS 355, foi o escalar com uma frequência fundamental de 50 Hz e uma frequência de comutação de 12 kHz. O espectro sonoro característico para o regime de vazio está representado na

figura 4.3(a), ao passo que a figura 4.3(b) representa o regime de plena carga.

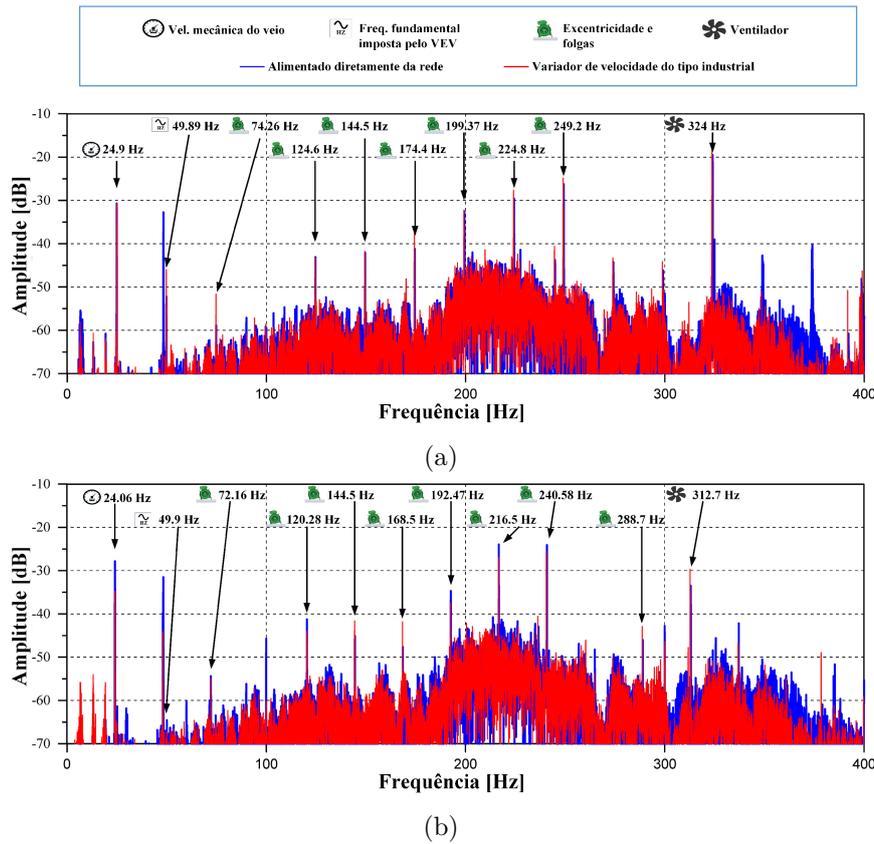


Figura 4.3: Espectros sonoros do motor em boas condições e alimentado por intermédio de um variador de velocidade industrial: (a) regime de vazio; (b) à plena carga.

Tendo em mente a análise efetuada anteriormente, é possível identificar um conjunto de frequências características provenientes de diferentes fontes de ruído, em que estes valores são praticamente coincidentes com os anteriormente apresentados na figura 4.2. Em média, as amplitudes destas componentes aumentaram comparativamente quando o motor de indução trifásico foi alimentado diretamente da rede.

Com o intuito de compreender a influência que o variador de velocidade industrial possui no espectro sonoro emitido pelo motor de indução trifásico, foram calculadas as suas frequências características de forma a efetuar uma análise interpretativa do mesmo. Para tal, foi realizado um conjunto de ensaios em que foram selecionadas as várias frequências de comutação,  $f_c$ , que o variador de velocidade permite (4 kHz, 8 kHz, 12 kHz e 16 kHz), com o controlo de tipo escalar selecionado. Foi ainda realizado um conjunto de ensaios com diferentes frequências de operação do acionamento (20 Hz, 35 Hz e 50 Hz), para os diferentes  $f_c$ , de forma a obter os valores de  $L_{eq\_A}$  e do  $L_{p\_C}$ .

Na realização destes ensaios foi utilizado um motor de indução trifásico que se encontra acoplado mecanicamente a um gerador de corrente contínua. O motor de indução trifásico não possui qualquer tipo de avaria e o regime de carga imposto foi o de vazio. O variador de velocidade

que alimenta o motor de indução foi instalado a 20 m de forma a minimizar o impacto do ruído emitido pela ventilação e comutação transístores bipolares. A tabela B.2, do anexo B, apresenta as características do equipamento utilizado neste ensaio.

A figura 4.4, ilustra os espectros sonoros obtidos para diferentes valores de  $f_c$ : 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz e 16 kHz, e para uma frequência de operação idêntica à frequência fundamental da rede 50 Hz.

Analisando os espectros sonoros da figura 4.4(a) à figura 4.4(d), torna-se perceptível a razão de aumentar a frequência de comutação como uma solução de diminuição do ruído sonoro emitido pelo motor de indução, uma vez que com aumento de  $f_c$  verifica-se que há uma redução das bandas laterais e das respetivas amplitudes, junto a  $f_c$ , e dos seus harmónicos na gama audível do ouvido humano, dos 20 Hz aos 20 kHz.

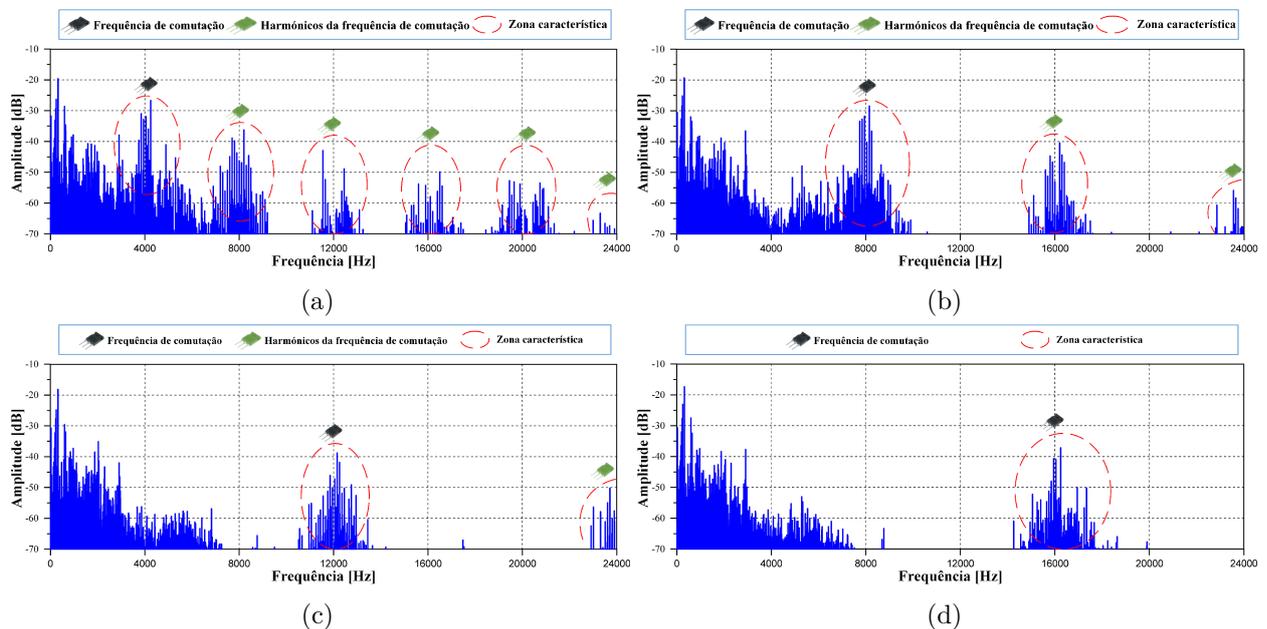


Figura 4.4: Espectro sonoro do motor alimentado pelo variador de velocidade para várias frequências: (a)  $f_c = 4$  kHz; (b)  $f_c = 8$  kHz; (c)  $f_c = 12$  kHz; (d)  $f_c = 16$  kHz.

A figura 4.5 demonstra a influência que a frequência de comutação e a frequência de operação, escolhidas pelo operador, têm no nível sonoro contínuo equivalente. Para tal, foram realizados uma série de ensaios, em regime de funcionamento em vazio e sem qualquer tipo de avaria, onde o valor da frequência de comutação foi variado entre os quatro valores permitidos pelo variador eletrónico de velocidade, e as frequências de operação selecionadas foram 20 Hz, 35 Hz e 50 Hz, registando o  $L_{eq\_A}$  correspondente.

Excetuando a frequência de comutação de 12 kHz na zona de frequência de operação dos 20 aos 35 Hz, verifica-se que, quanto menor a  $f_c$  e maior a frequência de operação aplicada ao motor de indução trifásico, maior o ruído emitido pelo mesmo.

O aumento do ruído emitido pelo motor de indução trifásico, deve-se à influência da frequência de operação e da frequência de comutação selecionadas. Como a maior fonte de ruído dos motor de

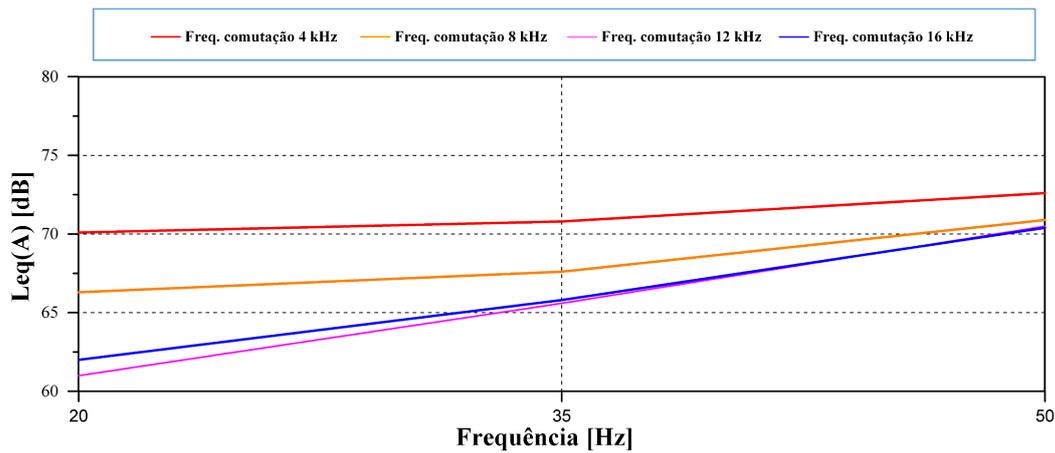


Figura 4.5: Nível sonoro contínuo equivalente para diferentes valores de frequência de comutação e de frequência de operação do acionamento.

indução utilizado é a de origem aerodinâmica e como está relacionada com a velocidade de rotação do veio, variando os valores de frequência de operação varia-se a intensidade do ruído emitido pelo conjunto das pás que constitui o ventilador.

De forma a complementar a influência que a frequência de comutação tem no espectro sonoro, são ainda analisadas as componentes espectrais que aparecem em torno da frequência comutação e dos seus múltiplos, em que o valor destas componentes foram obtidos pelo conjunto de equações (3.18) e (3.19) e a pela figura 3.11.

A influência destas componentes espectrais são apresentadas na figura 4.6, onde a figura 4.6(a) e figura 4.6(b) correspondem a uma  $f_c$  de 4 kHz ao passo que, a figura 4.6(c), corresponde a uma frequência de comutação de 12 kHz. Para comprovar o conjunto de equações (3.18) e (3.19), foi analisado unicamente a frequência de comutação de 4 kHz, visto que só é possível analisar os espectros sonoros até 24 kHz.

Nos gráficos dispostos na figura 4.6 são identificados cinco tipos de componentes espectrais com origens distintas: frequência de comutação, frequência dos harmônicos ímpares e a frequência do seu par correspondente obtido pela equação (3.18), frequência dos harmônicos pares obtido pela equação (3.19) e a frequência das componentes que emitem maior ruído, ilustrado na figura 3.11.

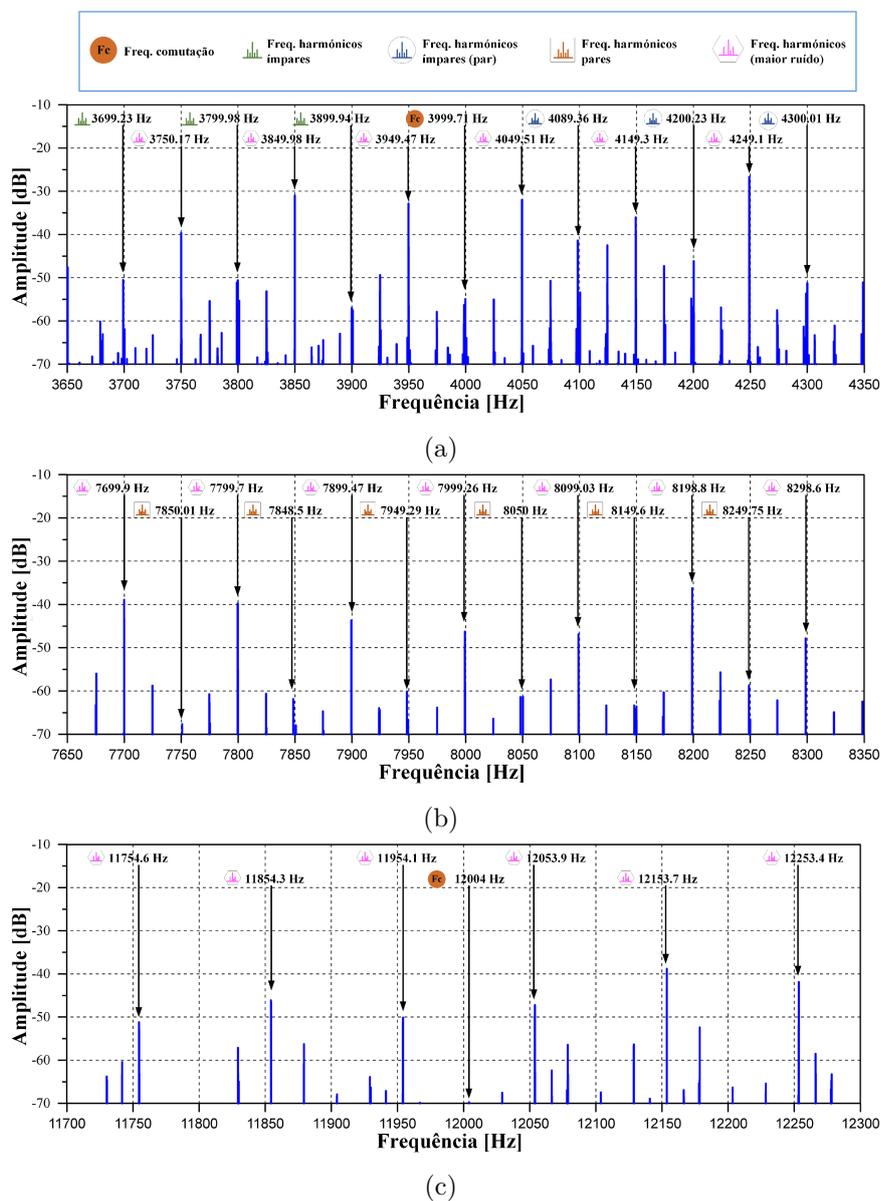


Figura 4.6: Espectro sonoro para as frequências de comutação: (a) 4 kHz (Gama: 3650 - 4350 Hz); (b) de 4 kHz (Gama: 7650 - 8350 Hz); (c) 12 kHz (Gama: 11700 - 12300 Hz).

### 4.2.2 Avarias nos rolamentos

Nesta secção são apresentados os espectros sonoros obtidos com uma avaria no anel externo e no anel interno dos rolamentos para regimes de carga distintos. Foram utilizados dois esquemas de montagem distintos: no primeiro esquema de montagem o motor de indução trifásico é alimentado diretamente da rede, ao passo que no segundo recorre-se à utilização de um variador de velocidade industrial. As figuras 4.7(a) e 4.7(b) representam o esquema de montagem quando o motor de indução trifásico é alimentado diretamente da rede e quando é utilizado um variador de velocidade industrial, respetivamente.

O motor de indução trifásico utilizado nos ensaios realizados com avarias nos rolamentos tinha os enrolamentos estatóricos ligados em triângulo. Este motor foi acoplado mecanicamente a um gerador de corrente contínua de excitação separada, a fornecer corrente a uma carga resistiva. O gerador de corrente contínua vai permitir a regulação do regime de carga do motor de indução objeto de análise, sendo esta regulação conseguida através da variação da corrente de excitação do gerador. As características nominais do equipamento utilizado nos diferentes esquemas de montagem da figura 4.7 são apresentadas na tabela B.1, no anexo B.

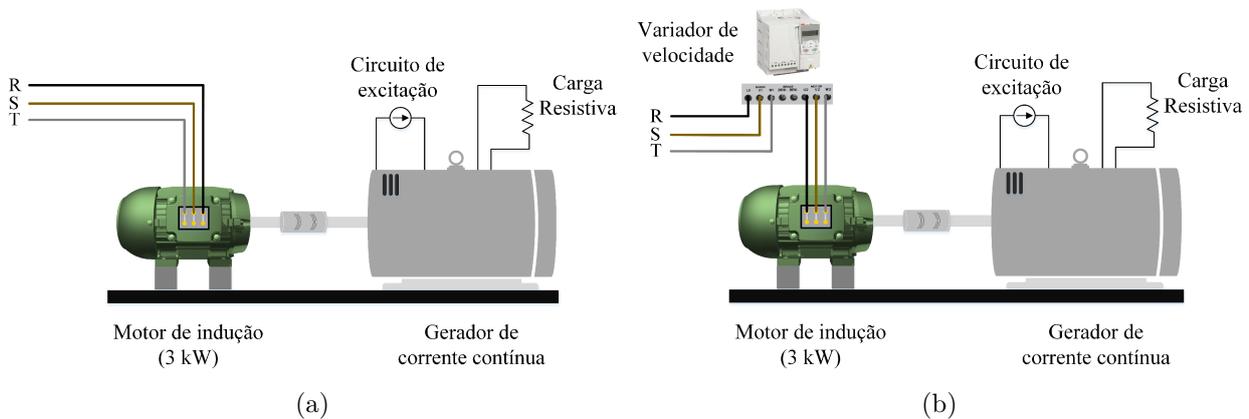


Figura 4.7: Esquemas de montagem utilizados nas avarias nos rolamentos: (a) alimentado diretamente da rede; (b) recorrendo a um variador de velocidade industrial.

Na realização dos ensaios foram utilizados rolamentos indicados pelo fabricante do motor de indução trifásico. No lado de ataque é utilizado um rolamento 6206 e no lado oposto ao ataque um rolamento 6205. A tabela 4.3 apresenta as características de cada rolamento.

Com o intuito de compreender o impacto deste tipo de avaria no sinal sonoro emitido pelo motor de indução trifásico, foram aplicados no lado oposto ao ataque rolamentos com avarias no anel externo e no anel interno com graus de severidade distintos: furo único de 2 e 4 mm [53], para distintos regimes de funcionamento do motor. A figura 4.8 ilustra um rolamento com um furo único de 2 mm e outro com um furo de 4 mm, ao passo que a tabela 4.4 identifica a velocidade e frequência mecânica de rotação do rotor para cada regime de carga, vazio e à plena carga.

Tabela 4.3: Características dos rolamentos.

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



Figura 4.8: Rolamentos com furos únicos de 2 e 4 mm.

De forma a realizar uma análise espectral que permita identificar as frequências características associadas a uma avaria nos rolamentos é necessário determinar as frequências características do anel interno e do anel externo, dum rolamento em bom estado, que variam com o regime de carga associado ao motor de indução trifásico. Para a determinação destes valores de frequências características é utilizado um dos conjuntos de equações (3.10) e (3.11), valores de frequências exatas, ou (3.16) e (3.17), valores de frequências aproximadas. O erro absoluto entre os valores de frequência obtidos pela fórmula exata ou fórmula aproximada é de 0.002 Hz.

A tabela 4.5 identifica os valores das frequências características dos anéis do rolamento para os diferentes regimes de carga aplicados ao motor de indução trifásico, obtidas através do conjunto de equações (3.14) e (3.15).

Correlacionando os valores da tabela 4.5 com o conjunto de equações (3.16) e (3.17) é possível obter as frequências características associadas a uma avaria no anel interno e anel externo dos

Tabela 4.4: Velocidade e frequência mecânica de rotação do rotor para diferentes regimes de carga do motor de indução trifásico utilizado nas avarias nos rolamentos.

<b>Regime de carga</b>	<b>Velocidade (rpm)</b>	<b>Frequência de rotação do rotor (Hz)</b>
Vazio	1498	24.97
Plena Carga	1444	24.07

Tabela 4.5: Frequências características das avarias estudadas no rolamento para diferentes regimes de carga do motor.

<b>Regime de carga</b>	$f_{ext}$ (Hz)	$f_{int}$ (Hz)
Vazio	89.88	134.82
Plena carga	86.65	129.96

rolamentos.

Com o intuito de perceber o impacto destas frequências características no espectro do sinal sonoro emitido pelo motor de indução trifásico para cada tipo de avaria, foram considerados os dois graus de severidade para os distintos regimes de carga e para os diferentes esquemas de montagem.

#### 4.2.2.1 Avaria no anel externo do rolamento

##### Motor de indução trifásico alimentado diretamente da rede

Neste ponto vão ser apresentados os espectros do sinal sonoro adquiridos quando o motor de indução trifásico é alimentado diretamente da rede e com uma avaria no anel externo no rolamento do lado oposto ao ataque. Como tal, foram identificadas as frequências características provenientes deste tipo de avaria, e são expostas em duas gamas de frequência para os diferentes regimes de carga: 0 - 800 Hz e 800 - 1600 Hz.

A gama de frequências utilizadas nos espectros sonoros obtidos (0 - 800 Hz e 800 - 1600 Hz) foi coerente com as gamas de frequência analisadas em [41] do sinal de vibração para o mesmo motor de indução trifásico objeto de estudo. Não são analisadas gamas superiores aos 1600 Hz uma vez que não apresentam resultados de elevada relevância tanto para sinais sonoros como para os sinais de vibração e elétricos adquiridos em [41].

A figura 4.9 e a figura 4.10 ilustram essas duas gamas de frequência para graus de severidade distintos no anel externo do rolamento e para o regime de funcionamento em vazio. A figura 4.9(a) e a figura 4.10(a) representam o espectro do sinal sonoro emitido pelo motor de indução trifásico na presença de uma avaria no anel externo de 2 mm, ao passo que para avaria de 4 mm é representado pelas figuras 4.9(b) e 4.10(b).

Tal como no espectro representado na figura 4.2(a), é possível identificar as distintas frequências características provenientes da frequência mecânica de rotação do rotor, a frequência fundamental, a frequência das excentricidades e folgas, a frequência da ventilação e as frequências características relativas ao ensaio realizado.

Com a introdução do rolamento com avaria no anel externo são visíveis as componentes espectrais características da avaria relativamente ao espectro sonoro do motor de indução trifásico sem avaria. Entre os dois graus de severidade foi realizada uma análise comparativa em que as frequências características da avaria são separadas em dois grupos: frequência de avaria única e frequência

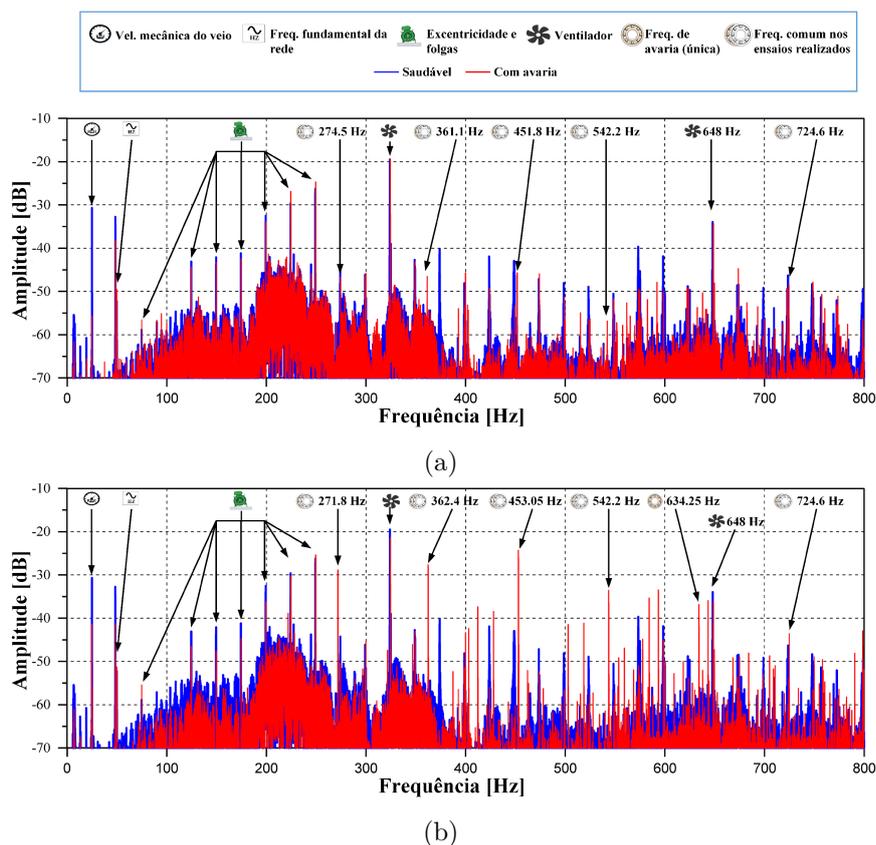


Figura 4.9: Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e em vazio, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

comum nos ensaios realizados.

O primeiro grupo distingue-se pelo facto da frequência identificada no espectro só aparecer para uma extensão da avaria. No entanto, o segundo grupo, para os diferentes graus de severidade, a mesma frequência característica é identificável em ambos os espectros sonoros.

Na avaria do anel externo do rolamento com um furo único de 2 mm, representado na figura 4.9(a), verifica-se que na gama de frequências dos 0 - 800 Hz não há um grande destaque das componentes espectrais associadas à avaria. Isto deve-se ao facto da avaria ser no anel externo e de baixa severidade. Esta gama de frequências também é caracterizada por ser suscetível a fenómenos de interferências construtivas ou interferências destrutivas da onda sonora da componente espectral em análise uma vez que para o mesmo valor de frequência existe um conjunto de possíveis origens.

Contudo, analisando o espectro do sinal sonoro da figura 4.9(a) foi possível identificar cinco frequências características associadas à avaria no anel externo do rolamento, e apresentam os seguintes valores: 274.5 Hz, 361.1 Hz, 451.8 Hz, 542.2 Hz e 724.6 Hz. As frequências características identificáveis foram catalogadas como frequências comuns aos ensaios realizados, uma vez que quando aumentado o grau de severidade, furo único de 4 mm ilustrado na figura 4.9(b), estas voltam a surgir, apresentando uma amplitude superior comparativamente ao furo único de 2 mm. Relativamente aos seus valores de frequência, por vezes estes não são coincidentes.

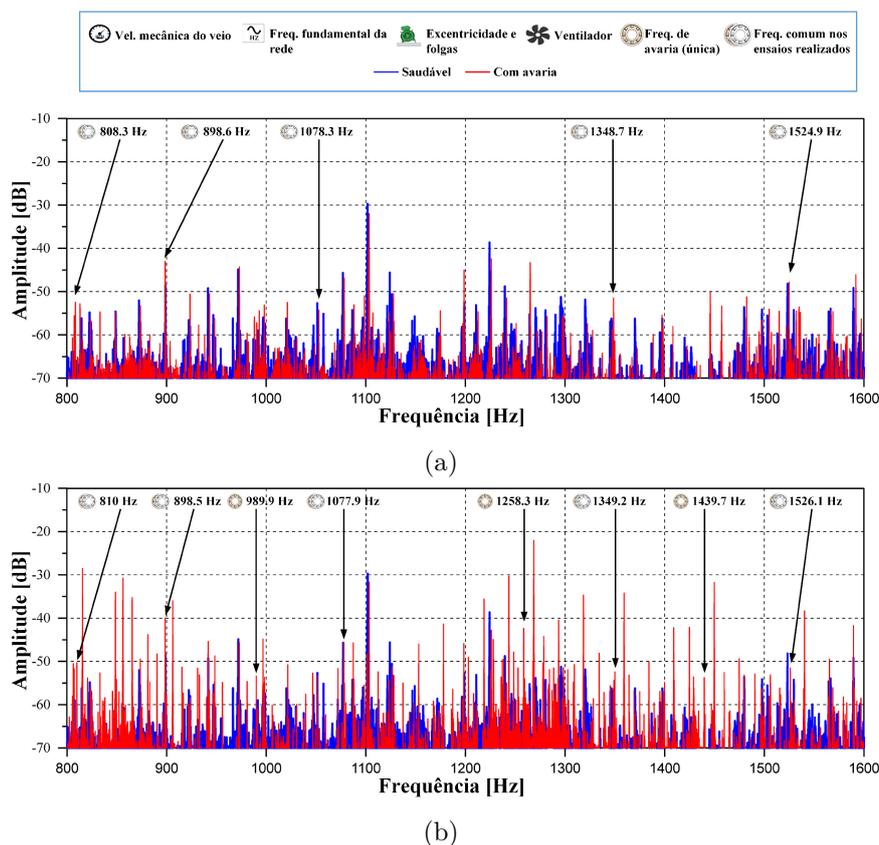


Figura 4.10: Espetros sonoros do motor ligado diretamente da rede e em vazio, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

Para além da identificação das frequências comuns, foi ainda identificada uma frequência aos 634.25 Hz, sendo esta catalogada como frequência de avaria única uma vez que só apareceu no espectro sonoro relativo à severidade de 4 mm. Prosseguindo para a gama de frequência dos 800 aos 1600 Hz, para o furo único de 2 mm (figura 4.10(a)) foi possível identificar, com alguma dificuldade, seis frequências características associadas à avaria no anel externo. Estas apresentam os seguintes valores: 808.3 Hz, 898.6 Hz, 1078.3 Hz, 1348.7 Hz e 1524.9 Hz.

Uma vez mais quando aumentado o diâmetro do furo, 4 mm, e ilustrado na figura 4.10(b), as frequências comuns em ambos ensaios, em geral, surgiram com uma maior amplitude. Foi ainda possível identificar três componentes espectrais únicas ao ensaio, tendo estas os seguintes valores de frequência: 989.9 Hz, 1358.3 Hz e 1439.7 Hz.

Em geral, analisando as figuras 4.9 e 4.10, verifica-se que para uma avaria com maior grau de severidade, torna-se mais fácil a distinção e a identificação das frequências características da mesma, uma vez que, em média, as suas amplitudes aumentam, ocorrência também verificada em [41].

A figura 4.11 e a figura 4.12 ilustram os espectros sonoros obtidos com o motor de indução trifásico a funcionar sob o regime de plena carga e com avaria no anel externo do rolamento, onde a avaria de 2 mm é caracterizada pela figura 4.11(a) e figura 4.12(a) e a avaria de 4 mm é caracterizada pelas figura 4.11(b) e figura 4.12(b).

De forma análoga à análise realizada para o regime de carga em vazio, conseguem-se identificar as frequências características das diferentes origens de ruído sonoro emitido pelo motor de indução trifásico. Exceção feita à frequência fundamental da rede, os valores das frequências características vão-se alterar, pois houve uma variação no valor da frequência mecânica de rotação do rotor.

Relativamente às frequências características associadas à avaria no anel externo do rolamento, estas foram identificadas novamente. No entanto, verifica-se que o sinal correspondente à avaria é mais ruidoso e as amplitudes das componentes espectrais são, de uma forma geral, menores, o que dificulta a identificação das mesmas. Contudo, houve uma melhoria na identificação das frequências na gama dos 0 - 800 Hz na avaria de 2 mm.

Verifica-se também que independentemente do regime de carga aplicado ao motor de indução trifásico, quanto maior for o grau da avaria, maior a facilidade de distinção e identificação as frequências características associadas a este tipo de avaria.

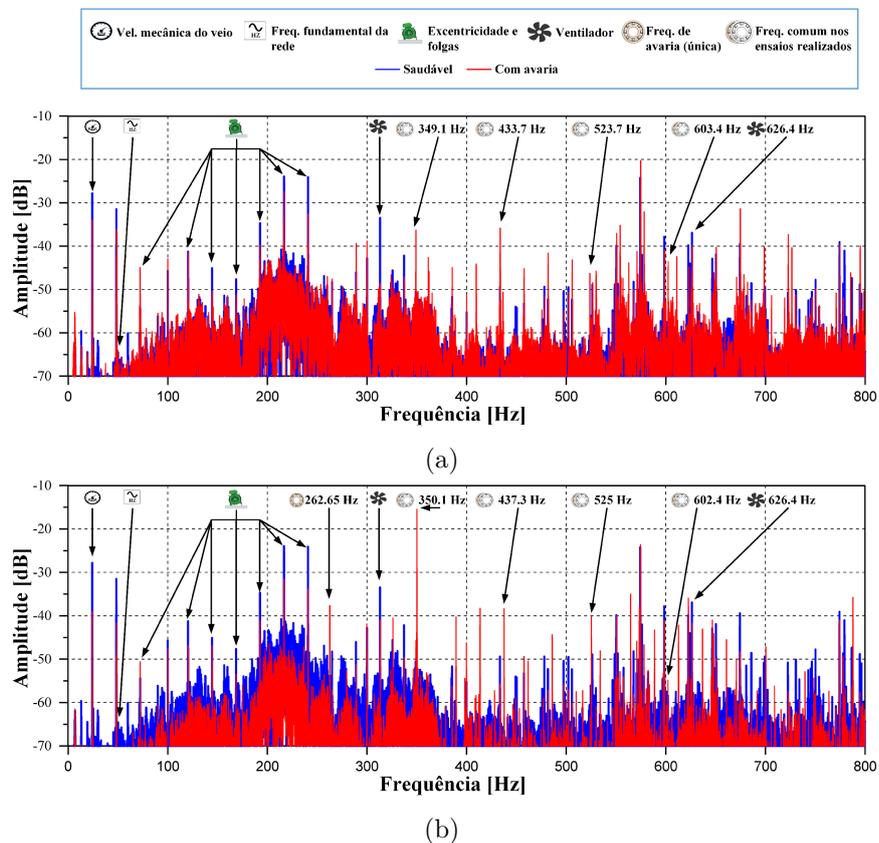


Figura 4.11: Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

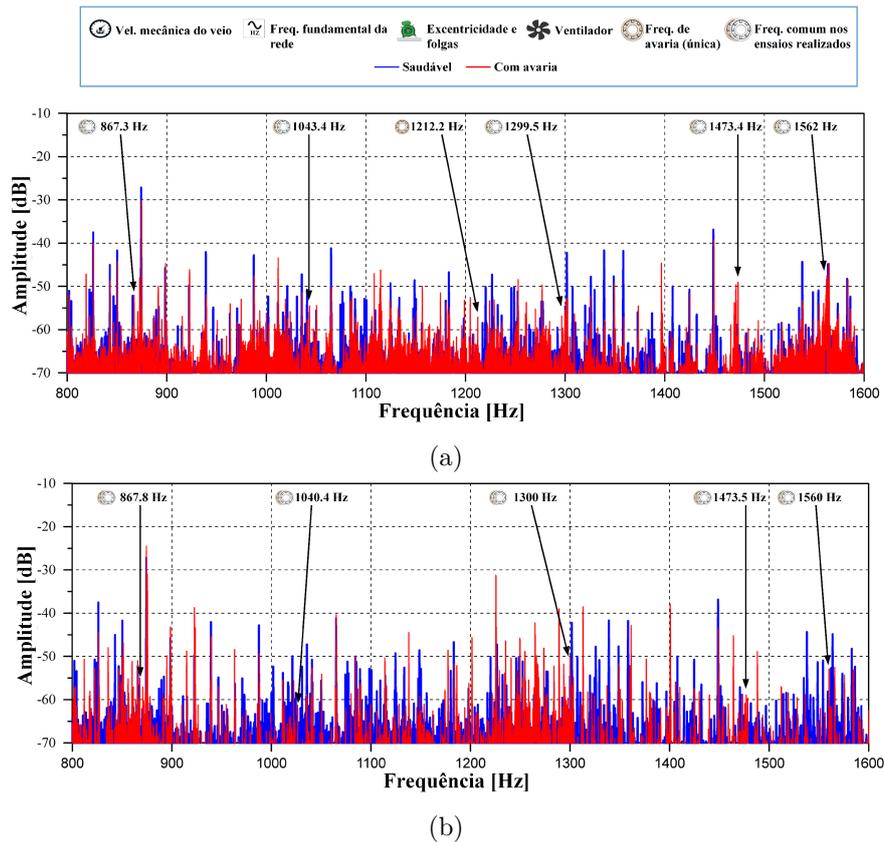


Figura 4.12: Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

### Motor de indução trifásico alimentado por um variador de velocidade industrial

Neste ponto vão ser apresentados os espectros do sinal sonoro adquiridos quando o motor de indução trifásico é alimentado por um variador de velocidade industrial, com uma frequência de comutação de 12 kHz, e com uma avaria no anel externo do rolamento do lado apostado ao ataque. Analogamente ao ensaio realizado com o motor alimentado diretamente da rede, as frequências características deste tipo de avaria, são expostas em duas gamas de frequência. As figuras 4.13 e 4.14 apresentam os espectros sonoros obtidos com uma avaria de 2 e 4 mm no anel externo do rolamento para o regime de funcionamento do motor de indução trifásico em vazio.

Para o furo único de 2 mm a análise na gama dos 0 - 800 Hz, ilustrado na figura 4.13(a), piorou relativamente à análoga, com o motor de indução trifásico ligado diretamente da rede, uma vez que houve uma redução de componentes espectrais possíveis de identificar. No entanto, há três valores de frequência características que surgem em ambos tipos de alimentação. Estas apresentam os seguintes valores: 274.3 Hz, 539.7 Hz e 724.4 Hz, quando alimentado pelo variador de velocidade industrial, onde surgem com maior amplitude, e 274.5 Hz, 542.2 Hz e 724.6 Hz, quando alimentado diretamente da rede. Na gama dos 800 aos 1600 Hz, verificou-se uma melhoria, pois foi possível identificar mais componentes espectrais associadas à severidade de 2 mm.

No furo de 4 mm, caracterizado pelas figuras 4.13(b) e 4.14(b), o número de componentes

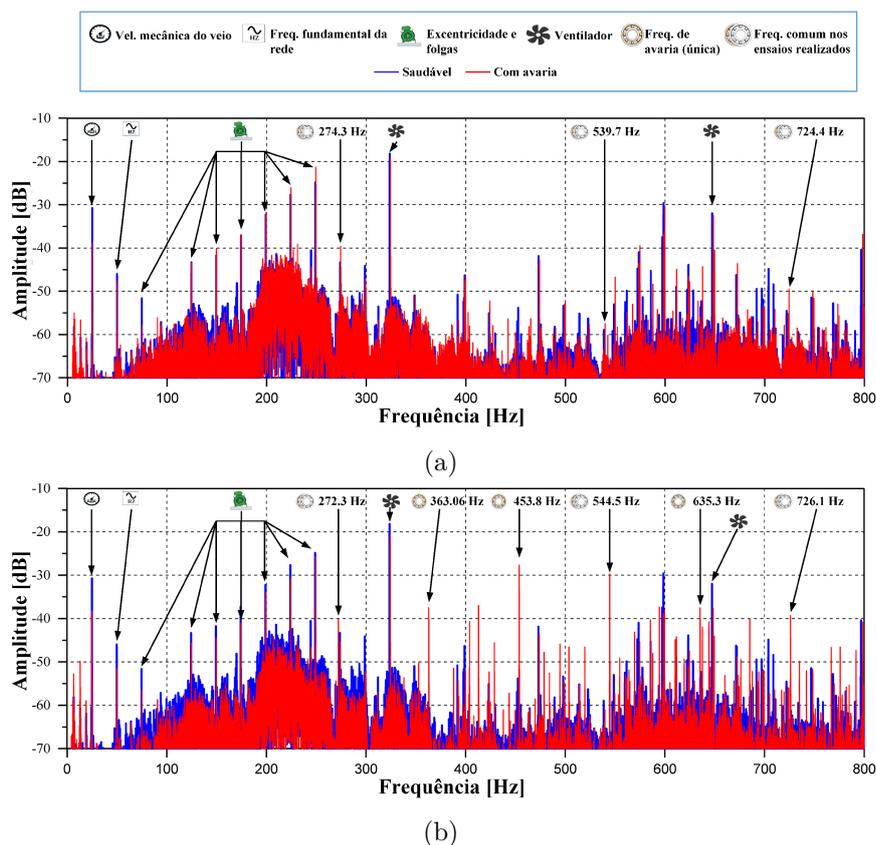


Figura 4.13: Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e em vazio, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

espetrais identificáveis mantêm-se inalterado, apesar do destaque destas ser menor. No entanto, para ambos os tipos de alimentação aplicados ao motor de indução trifásico, na gama dos 0 a 800 Hz são comuns as três primeiras frequências identificáveis: 271.8 Hz, 362.4 Hz e 453.05 Hz.

No regime de funcionamento do motor de indução à plena carga, ilustrado pela figura 4.15 e figura 4.16, obtém-se uma ligeira melhoria na identificação das respetivas frequências características apesar de, em média, as suas amplitudes terem diminuído, quando comparadas com o conjunto das figuras 4.11 e 4.12. Esta melhoria deve-se a uma maior distinção das componentes espectrais associadas à avaria, relativamente ao espectro do motor "saudável", possibilitando assim a identificação de mais componentes espectrais na gama de frequência entre os 0 e os 800 Hz.

As figuras 4.15(a) e 4.16(a) apresentam os espectros para um furo único de 2 mm no anel externo ao passo que, as figuras 4.15(b) e 4.16(b) correspondem ao furo de 4 mm, ao regime de plena carga.

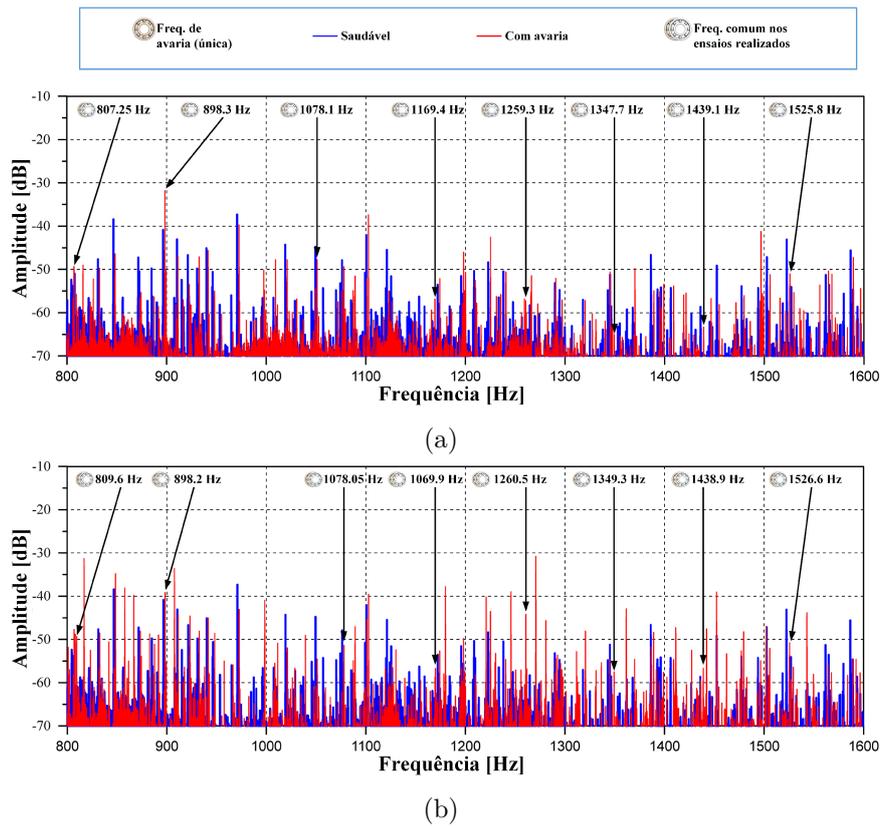


Figura 4.14: Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e em vazio, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

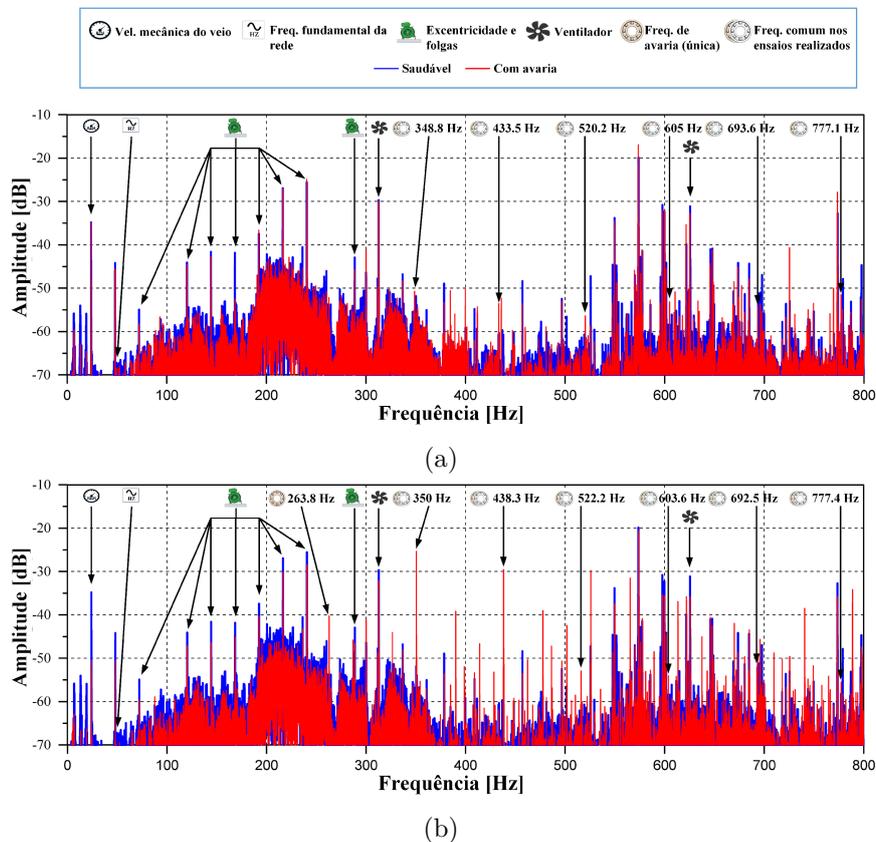


Figura 4.15: Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

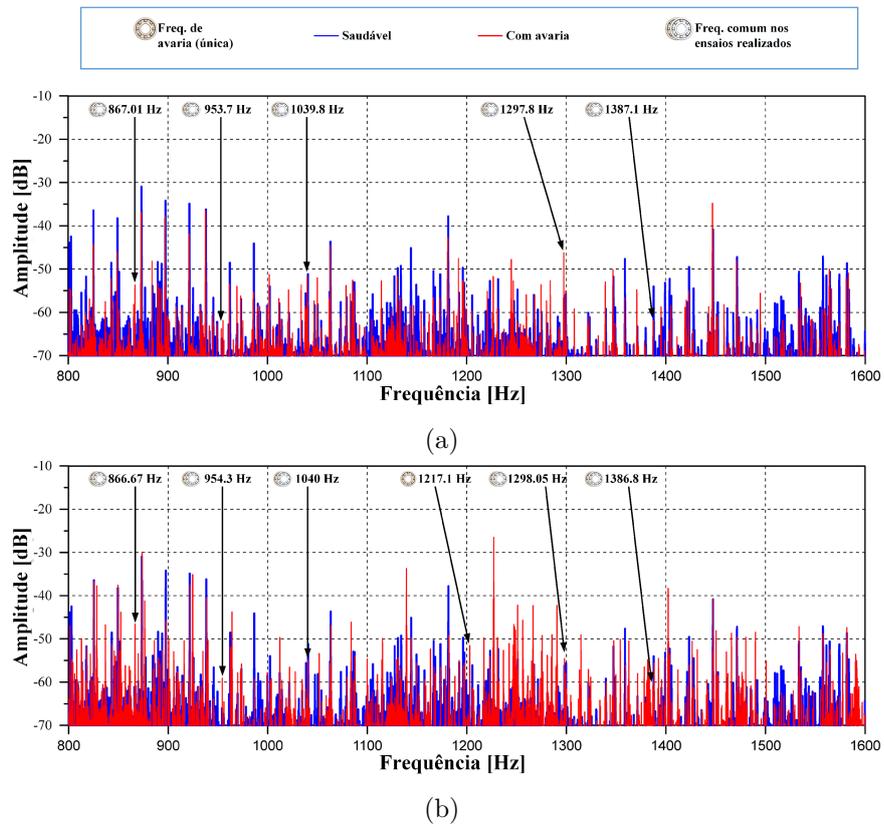


Figura 4.16: Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

#### 4.2.2.2 Avaria no anel interno do rolamento

##### Motor de indução trifásico alimentado diretamente da rede

Neste ponto são apresentados os espectros sonoros obtidos na presença de uma avaria no anel interno do rolamento com furo único de 2 mm e 4 mm, quando o motor de indução trifásico é alimentado diretamente da rede. A avaria no anel interno do rolamento é caracterizada pelo aparecimento de diversas componentes espectrais que estão relacionadas com a frequência característica do anel interno e com a frequência mecânica de rotação, como expresso em (3.16).

Tal como na avaria do anel externo no rolamento, quando aplicado o rolamento com avaria interna, as componentes espectrais características da avaria distinguem-se das restantes, tornando fácil a sua identificação e análise. As figuras 4.17 e 4.18 apresentam os espectros sonoros obtidos com a presença de uma avaria no anel interno do rolamento para o funcionamento do motor de indução trifásico em vazio. As figuras 4.17(a) e 4.18(a) correspondem a uma avaria de furo único de 2 mm ao passo que para o furo único de 4 mm é caracterizado pelas figuras 4.17(b) e 4.18(b).

Analisando as figuras 4.17(a) e 4.17(b) verifica-se que, na gama de frequência dos 0 aos 800 Hz, houve uma representação mais significativa das componentes espectrais das frequências características relativas à avaria no anel interno, em relação ao verificado na avaria no anel externo do rolamento. Esta representação mais significativa das componentes espectrais verifica-se para os ambos os graus de severidade, 2 mm e 4 mm.

As figuras 4.19 e 4.20 ilustram os espectros do sinal sonoro obtidos com avaria de 2 ou 4 mm no anel interno do rolamento e com o motor de indução trifásico a funcionar à plena carga. São identificadas algumas diferenças relativamente ao regime de funcionamento do motor em vazio, tais como o aumento de componentes espectrais características da avaria, na zona crítica do espectro entre os 0 e os 400 Hz. No furo único de 2 mm esta componente espectral surge aos 324.1 Hz, ao passo que para o furo de 4 mm foi possível identificar uma componente espectral com valor de frequência de 259 Hz. Verifica-se ainda que com o acoplar de carga houve um aumento de componentes espectrais identificáveis, aspeto esse não verificado na avaria do anel externo do rolamento.

Como verificado na avaria no anel externo do rolamento, com o acoplar de carga ao motor de indução trifásico surge a componente espectral de valor 100 Hz com uma amplitude considerável.

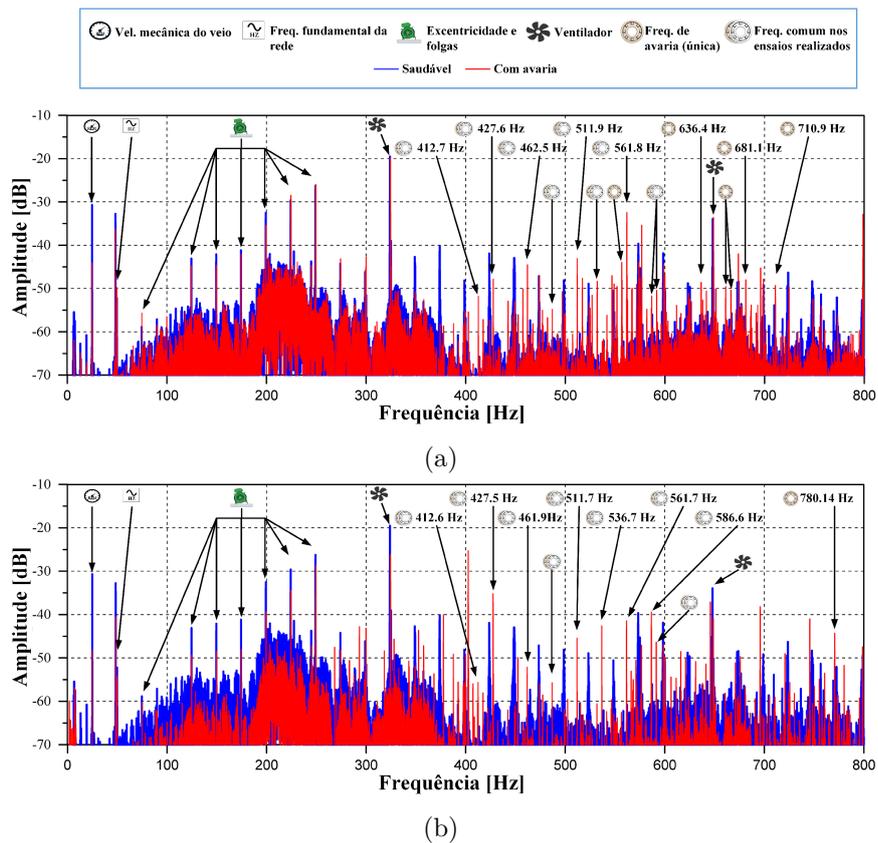


Figura 4.17: Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e em vazio, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

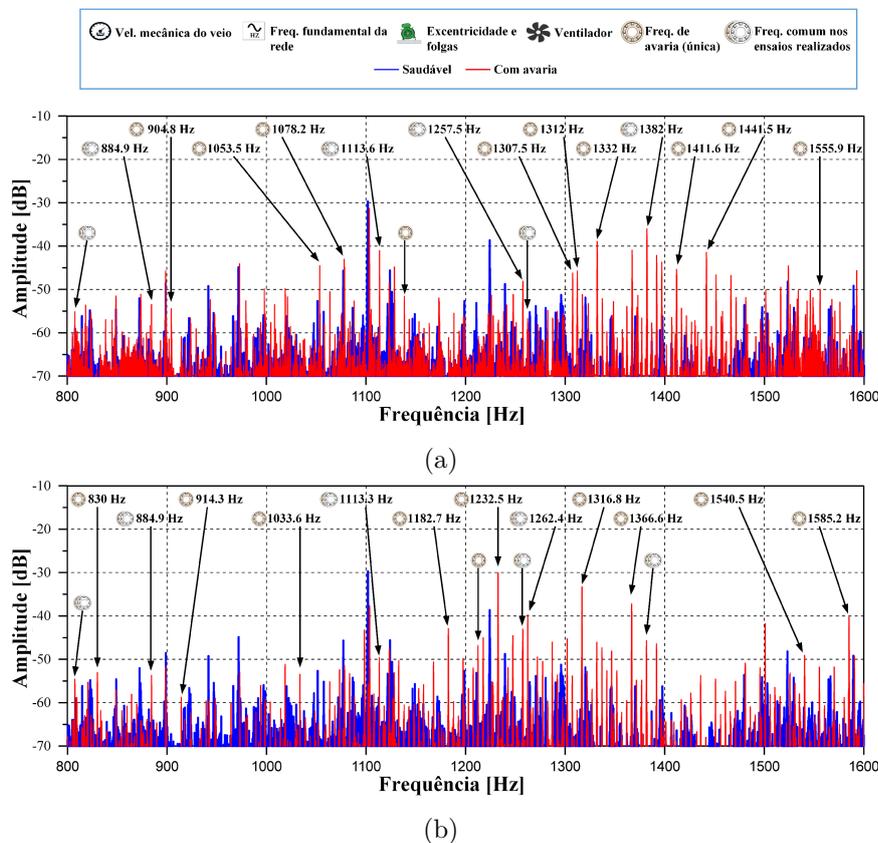


Figura 4.18: Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e em vazio, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

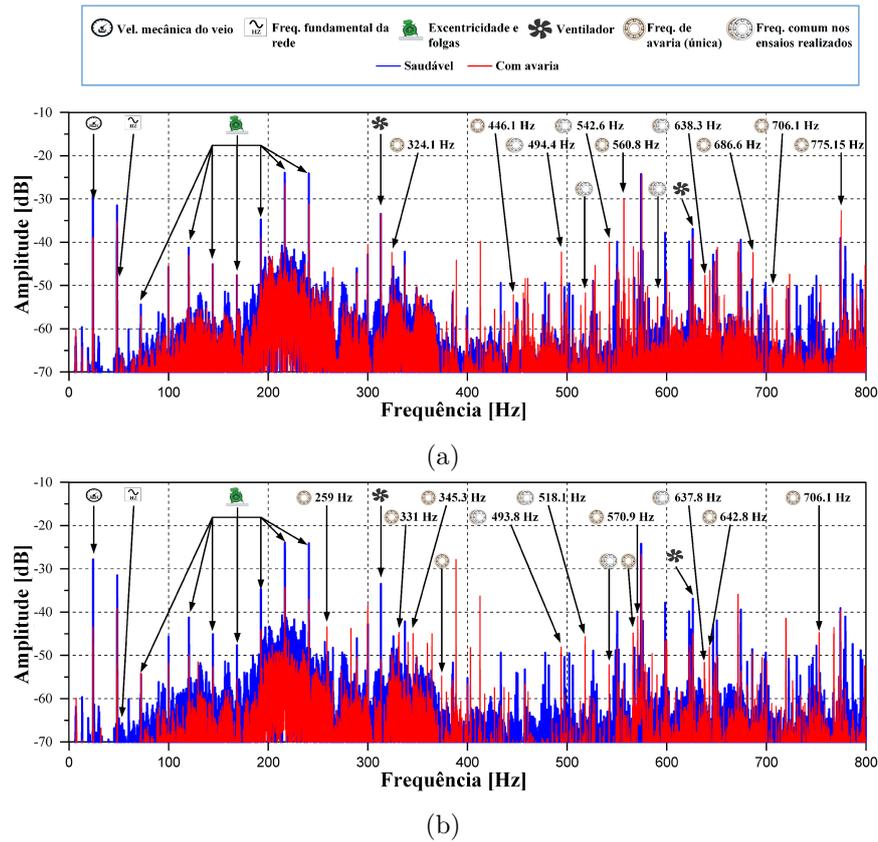


Figura 4.19: Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

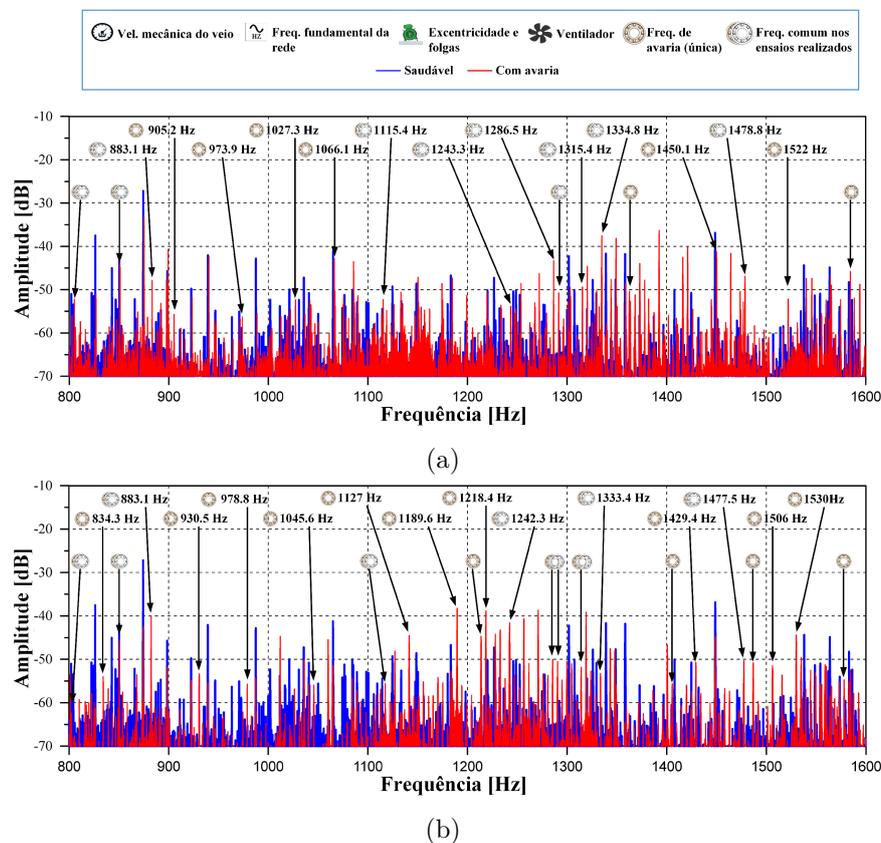


Figura 4.20: Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

### Motor de indução trifásico alimentado por um variador de velocidade industrial

Nas figuras 4.21 e 4.22 estão representados os espectros sonoros relativos a uma avaria no anel interno do rolamento com o motor de indução trifásico em regime de funcionamento de vazio e alimentado por um variador de velocidade industrial com uma frequência de comutação de 12 kHz.

Recorrendo a uma análise comparativa para o mesmo tipo de avaria aplicada ao motor de indução trifásico mas alimentado diretamente da rede, verifica-se uma melhoria tanto a nível das componentes espectrais associadas à avaria como na identificação das mesmas. Esta melhoria ocorreu tanto para o furo de 2 mm como para o de 4 mm, em ambas as gamas espectrais utilizadas, de 0 aos 800 Hz e dos 800 aos 1600 Hz.

Comparando a figura 4.17(a) com a figura 4.21(a) que representa a gama de 0 a 800 Hz para o menor grau de severidade deste tipo de avaria, verifica-se o aumento das componentes espectrais características identificáveis. Esta peculiaridade mantém-se de igual modo para o grau de severidade de 4 mm e para a gama dos 800 aos 1600 Hz.

As figuras 4.23 e 4.24 representam o regime de funcionamento do motor de indução trifásico à plena carga na presença da avaria em discussão. Na continuidade dos resultados já apresentados, a introdução deste regime de carga no motor aumenta o número de componentes espectrais identificáveis, tanto para o furo de 2 mm ilustrados nas figuras 4.23(a) e 4.24(a) como, para o furo de 4 mm representados pelas figuras 4.23(b) e 4.24(b), onde foi possível identificar frequências abaixo dos 300 Hz com alguma significância espectral.

De forma a concluir a secção de avaria nos rolamentos, verificou-se durante a análise efetuada aos espectros sonoros obtidos para as avarias no anel externo e no anel interno do rolamento, que nem sempre o valor das frequências comuns nos ensaios são coincidentes. Esta divergência nos valores pode estar relacionado com o facto das medições não terem sido realizadas num ambiente anecoico, apesar das medições terem sido efetuadas na zona designada por campo livre.

A tabela 4.6 e tabela 4.7 apresentam os valores obtidos referentes ao nível sonoro contínuo equivalente ponderado A e ao nível sonoro máximo ponderado C, para as diferentes avarias acima descritas (no anel externo e interno do rolamento) e diferentes esquemas de montagem aplicados ao motor de indução trifásico.

De acordo com as mesmas tabelas, verifica-se que a situação em que o motor de indução trifásico não contém qualquer tipo de avaria, é aquela que apresenta o menor valor de  $L_{eq\_A}$ . Com o aumento do regime de carga há uma redução de cerca de 1 dB o que comprova que quando há um aumento do regime de carga no motor de indução trifásico, o valor de  $L_{eq\_A}$  diminui, uma vez que a fonte de ruído predominante deste é a de origem aerodinâmica. Esta redução no nível sonoro contínuo equivalente não se verificou quando o motor de indução foi alimentado por um variador de velocidade industrial, isto porque há um aumento do ruído de origem eletromagnética.

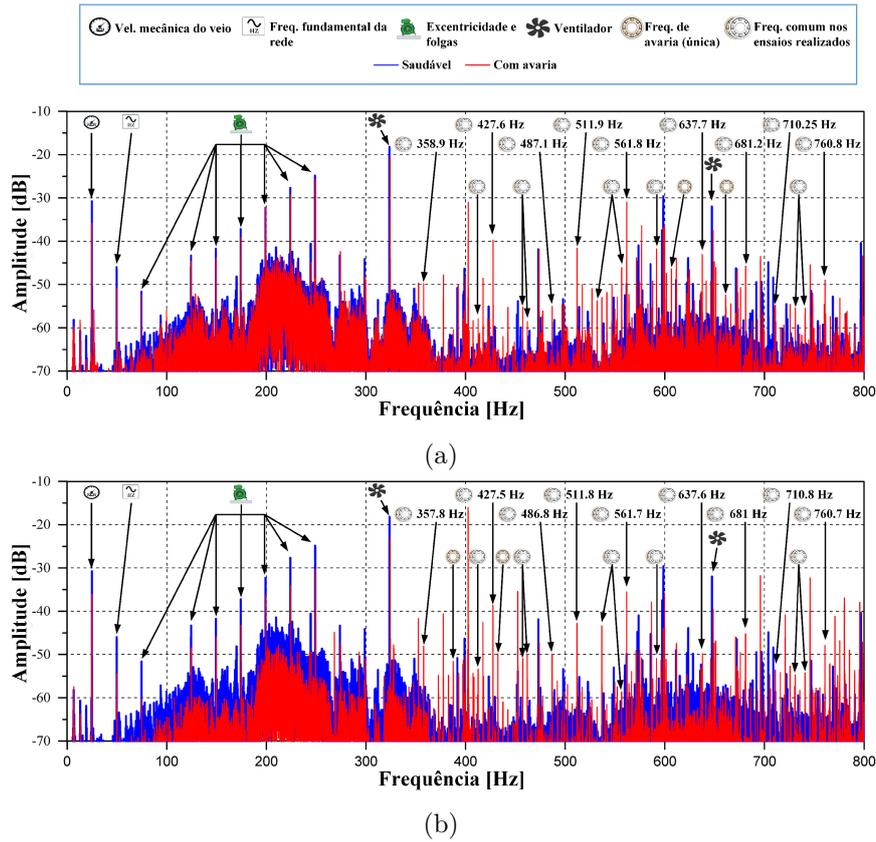


Figura 4.21: Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e em vazio, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

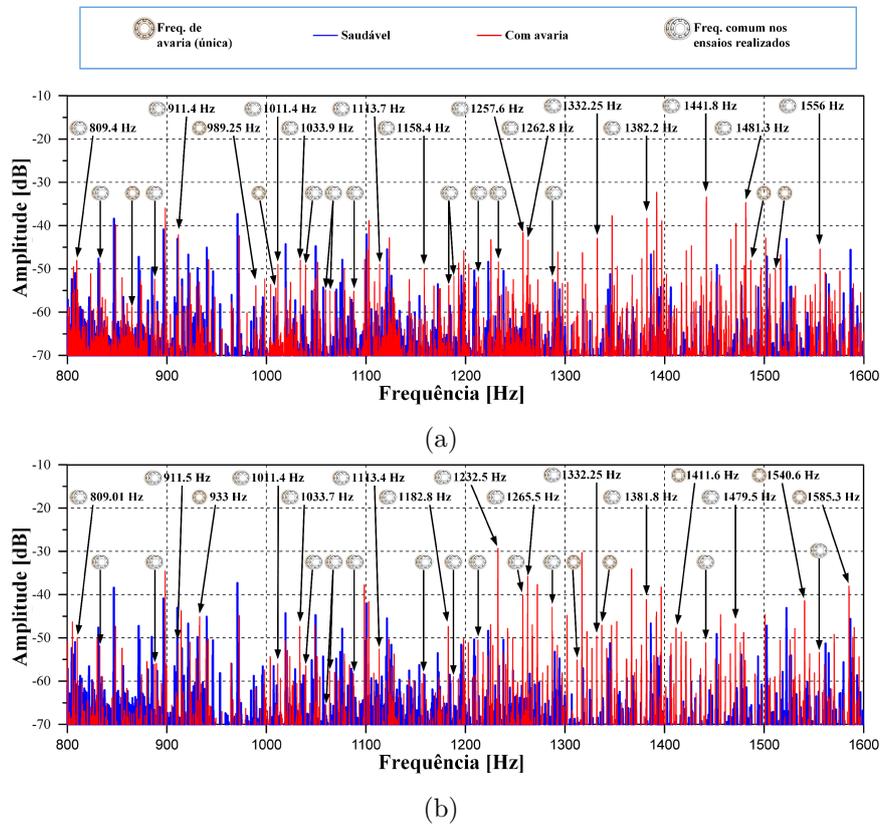


Figura 4.22: Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e em vazio, com avaria no anel interno do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

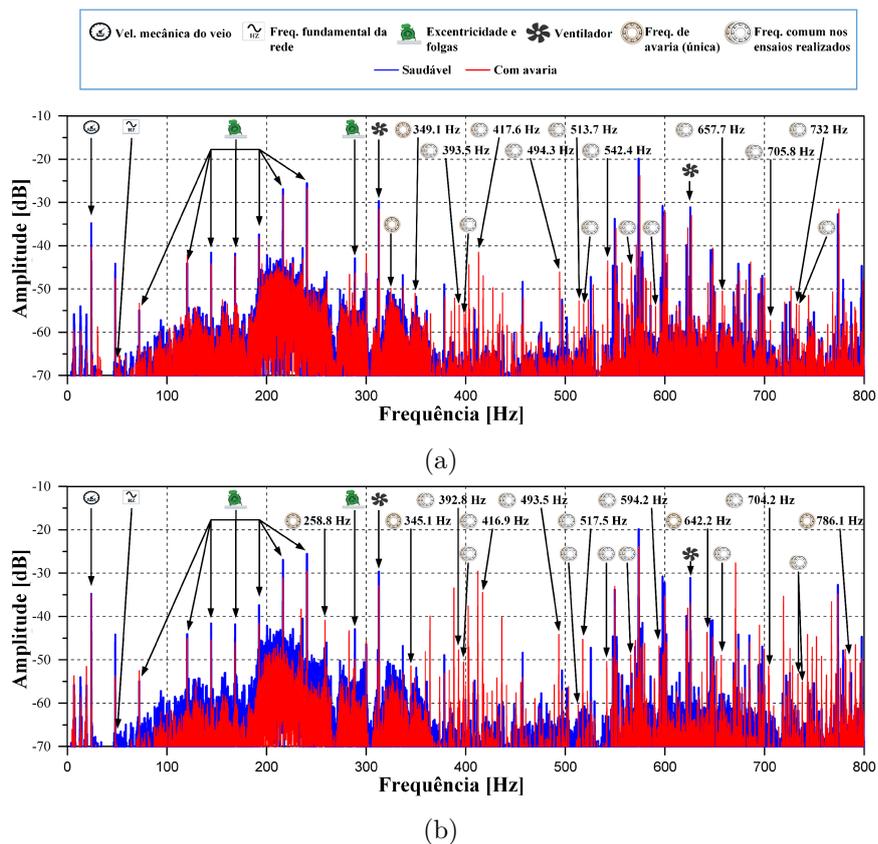


Figura 4.23: Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

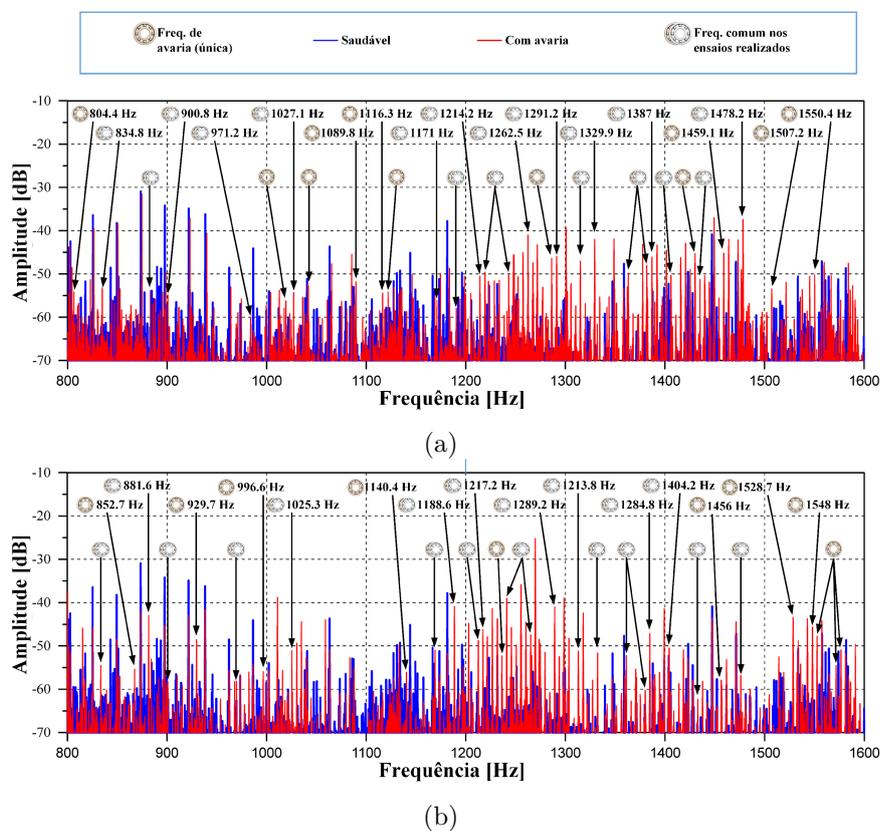


Figura 4.24: Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria no anel externo do rolamento: (a) avaria de 2 mm; (b) avaria de 4 mm.

Relativamente à introdução de avarias no motor de indução trifásico observa-se um aumento do  $L_{eq\_A}$  e do  $L_{p\_C}$  com o aumento da severidade da avaria, distinguindo-se a avaria de 4 mm no anel interno do rolamento como a avaria mais ruidosa a nível sonoro e a avaria de 2 mm do anel externo como a menos ruidosa. Também se verifica que quando o motor de indução trifásico é alimentado por um variador de velocidade industrial, em geral, há um aumento de  $L_{eq\_A}$  e do  $L_{p\_C}$ , quando comparado com as avarias homólogas com o motor alimentado diretamente da rede.

O aumento do  $L_{eq\_A}$  e do  $L_{p\_C}$  também comprova a facilidade de distinção das componentes espectrais da avaria para maiores graus de severidade e tipo de avaria aplicada ao motor, no entanto,  $L_{eq\_A}$  e do  $L_{p\_C}$  não podem ser usados como indicadores dos tipos de avaria ou graus de severidade.

Tabela 4.6: Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para avaria nos rolamentos e o motor de indução trifásico alimentado diretamente da rede.

<b>Funcionamento do motor em vazio e avarias nos rolamentos</b>					
Medida/Ensaio	Saudável	Ext. 2 mm	Ext. 4 mm	Int. 2 mm	Int. 4 mm
$L_{eq\_A}$ [dB]	70.4	70.5	76.8	73.3	79.0
$L_{p\_C}$ [dB]	87.8	88.2	91.4	86.9	93.7

<b>Funcionamento do motor à plena carga e avarias nos rolamentos</b>					
Medida/Ensaio	Saudável	Ext. 2 mm	Ext. 4 mm	Int. 2 mm	Int. 4 mm
$L_{eq\_A}$ [dB]	69.5	71	77.4	73.2	78.4
$L_{p\_C}$ [dB]	85.8	86.5	92.0	89.0	92.3

Tabela 4.7: Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para avaria nos rolamentos e o motor de indução trifásico alimentado por um variador de velocidade industrial.

<b>Funcionamento do motor em vazio e avarias nos rolamentos</b>					
Medida/Ensaio	Saudável	Ext. 2 mm	Ext. 4 mm	Int. 2 mm	Int. 4 mm
$L_{eq\_A}$ [dB]	70.5	70.8	75.8	73.6	79.5
$L_{p\_C}$ [dB]	88.6	88.5	91	90.2	94.1

<b>Funcionamento do motor à plena carga e avarias nos rolamentos</b>					
Medida/Ensaio	Saudável	Ext. 2 mm	Ext. 4 mm	Int. 2 mm	Int. 4 mm
$L_{eq\_A}$ [dB]	72	73.2	76.9	74	78.5
$L_{p\_C}$ [dB]	87.8	89.6	91	88.9	92.2

### 4.2.3 Avaria nas barras do rotor

Nesta secção são apresentados os espectros sonoros obtidos com uma avaria nas barras do rotor para regimes de carga distintos. Para este tipo de avaria foram utilizados dois esquemas de montagem: o primeiro esquema de montagem com o motor de indução trifásico alimentado diretamente

da rede, ao passo que no segundo esquema de montagem recorre-se à utilização de um variador de velocidade industrial. As figuras 4.25(a) e 4.25(b) representam o esquema de montagem quando o motor de indução trifásico é alimentado diretamente da rede e quando é utilizado um variador de velocidade industrial, respetivamente.

Estes esquemas de montagem são idênticos aos utilizados nas avarias nos rolamentos, com a exceção do motor de indução trifásico utilizado. As características nominais do equipamento utilizado nos diferentes esquemas de montagem da figura 4.25, são apresentados na tabela B.3, do anexo B.

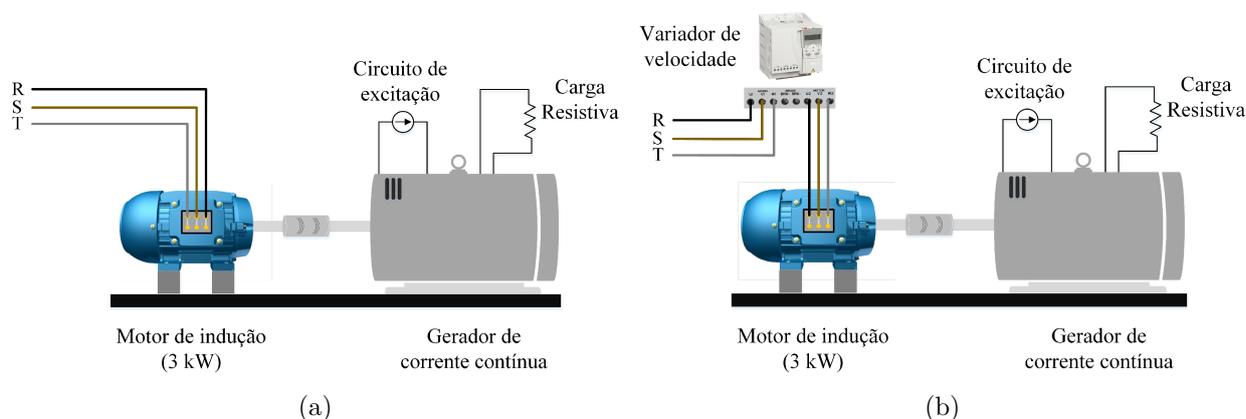


Figura 4.25: Esquemas de montagem utilizados na avaria nas barras do rotor: (a) alimentado diretamente da rede; (b) recorrendo a um variador de velocidade industrial.

Tal como nos ensaios anteriormente realizados, na avaria nas barras do rotor também foi utilizado um motor de indução trifásico com os enrolamentos estatóricos ligados em triângulo. Este motor foi acoplado mecanicamente a um gerador de corrente contínua de excitação separada, a fornecer corrente a uma carga resistiva. O gerador de corrente contínua permite a regulação do regime de carga do motor de indução objeto de análise, através da variação da corrente de excitação do gerador. A tabela 4.8 identifica a velocidade e frequência mecânica de rotação do rotor para cada regime de carga.

Tabela 4.8: Velocidade e frequência mecânica de rotação do rotor para os diferentes regimes de carga e avaria nas barras do rotor.

Regime de carga	Velocidade (rpm)	Frequência de rotação (Hz)
Vazio	1498	24.97
Plena Carga	1404	23.4

Ao invés do ocorrido na análise realizada às avarias nos rolamentos, para a avaria nas barras do rotor foram apenas realizados ensaios com o motor de indução trifásico em regime de funcionamento à plena carga, uma vez que em regime de vazio não se torna relevante a contribuição deste tipo de

avarias. Com o intuito de compreender o impacto deste tipo avaria no sinal sonoro emitido pelo motor de indução trifásico, foram aplicados rotores com distintos graus de severidade, rotor com uma barra fraturada ou com duas barras fraturadas. Estas severidades foram conseguidas através de um furo nas barras do rotor. A figura 4.26 ilustra esses graus de severidade aplicados ao rotor do motor de indução.

De forma proceder-se a uma análise espectral do sinal sonoro obtido foram calculadas as frequências características das fontes de ruído sonoro habituais num motor de indução trifásico, de origem mecânica, origem aerodinâmica e origem eletromagnética. O valor destas frequências características é conseguido usando a tabela 4.2 e tendo em mente as características nominais do motor de indução trifásico utilizado na realização destes ensaios.

A determinação dos valores das frequências características associadas a uma avaria nas barras do rotor é conseguida recorrendo a (3.4), onde substituindo as suas variáveis obtém-se para o primeiro termo o conjunto de frequências com o valor 20.25 Hz e 26.58 Hz. No entanto, de forma a realizar a análise de 0 - 800 Hz e dos 800 - 1600 Hz é necessário calcular até ao septuagésimo termo.

### Motor de indução trifásico alimentado diretamente da rede

Neste ponto vão ser analisados os espectros sonoros obtidos provenientes de uma avaria nas barras do rotor, uma ou duas barras fraturadas, com o motor de indução trifásico alimentado diretamente da rede. As figuras 4.27 e 4.28 apresentam uma comparação dos espectros sonoros entre a situação em que o rotor do motor de indução trifásico não possui qualquer tipo de barra fraturada e outra quando este possui uma ou duas barras fraturadas no rotor. As figuras 4.27(a) e 4.28(a) caracterizam a avaria numa barra do rotor, ao passo que as figuras 4.27(b) e 4.28(b) caracterizam a avaria em duas barras.



Figura 4.26: Rotor com uma e duas barras fraturadas.

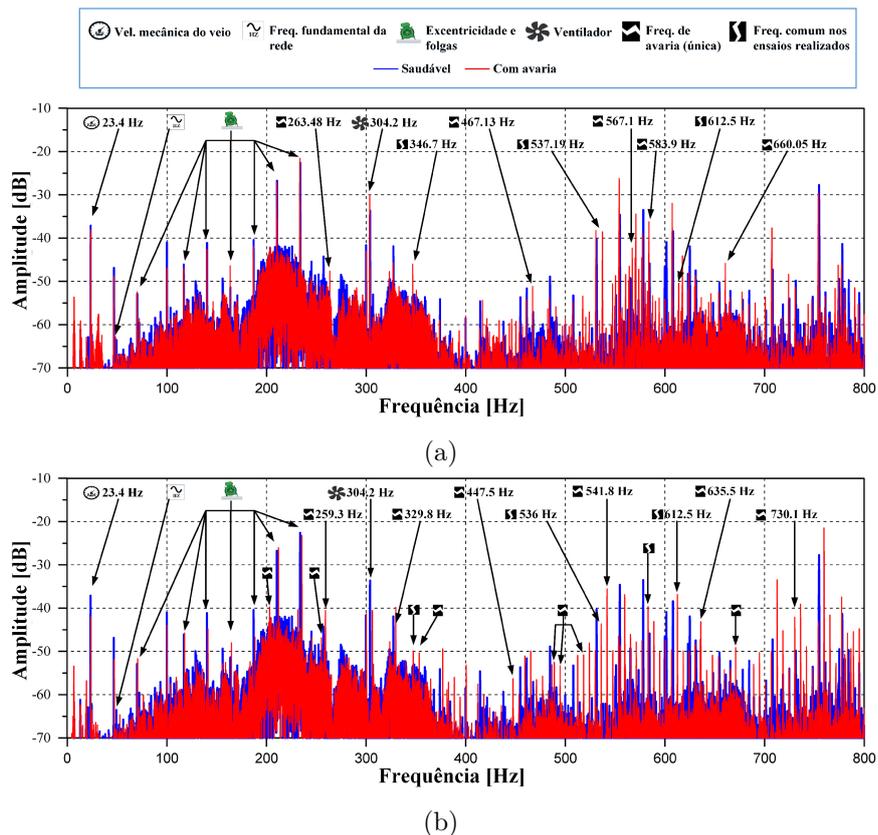


Figura 4.27: Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria nas barras do rotor: (a) 1 barra fraturada; (b) duas barras fraturadas.

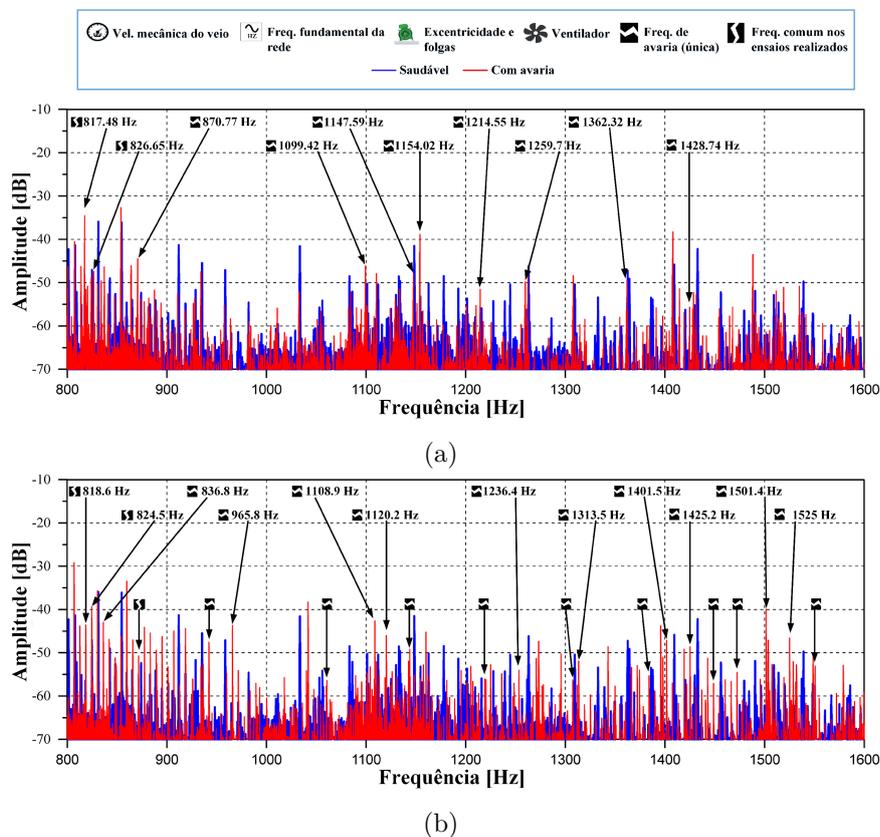


Figura 4.28: Espectros sonoros do motor ligado diretamente da rede e à plena carga, com avaria nas barras do rotor: (a) 1 barra fraturada; (b) duas barras fraturadas.

Analogamente aos espectros sonoros obtidos com uma avaria no rolamento, numa fase primordial é possível identificar um conjunto de frequências características provenientes das diferentes fontes de ruído, em que os valores destas frequências e a sua origem estão devidamente identificados nos espectros. Nas figuras 4.27(a) e 4.27(b), a primeira frequência identificável provém da rotação do veio/rotor do motor indução trifásico no qual, este veio/rotor, se encontra acoplado mecanicamente ao gerador de corrente contínua. O valor desta frequência característica é obtido através da equação (3.9) e coincide com a frequência mecânica de rotação do rotor com o valor de 23.4 Hz.

Seguidamente, é possível identificar a componente da frequência fundamental imposta pela rede, apresentando um valor de 49.9 Hz. Verificou-se que esta novamente não possui uma elevada influência na produção de ruído. No entanto, ao lado esquerdo da frequência fundamental, nota-se uma frequência com uma amplitude considerável. Esta surge aos 46.7 Hz e não se conseguiu apurar a causa ou origem da mesma.

Prosseguindo no espectro sonoro, é possível identificar o conjunto de sete frequências características com origem em excentricidades e folgas. A obtenção dos valores das frequências características é conseguido recorrendo à equação (3.7), e estas apresentam os seguintes valores: 70.1 Hz, 116.85 Hz, 140.01 Hz, 163.55 Hz, 187 Hz, 210.3 Hz e 233.75 Hz.

Por último é visível a relevante contribuição que a ventilação tem na produção de ruído sonoro. O valor da sua frequência característica foi obtido recorrendo a (3.1), e uma vez que o ventilador possui treze pás obtém-se o valor 304.2 Hz. No espectro sonoro também é possível verificar o aparecimento do harmónico par da frequência de ventilação, que surge aos 608.3 Hz com uma amplitude considerável.

Com a introdução de um rotor com avaria nas barras do rotor do motor de indução trifásico, torna-se visível as alterações das componentes espectrais que constituem o espectro sonoro, comparativamente ao rotor na situação saudável. Assim sendo, de forma a fazer uma análise comparativa entre os dois graus de severidade, as componentes espectrais relativas a este tipo de avaria são agrupadas em dois grupos: frequência de avaria única e frequência comum nos ensaios realizados.

As figuras 4.27(a) e 4.28(a) representam os espectros obtidos na presença do rotor com uma barra fraturada ao passo que, para duas barras fraturadas os espectros obtidos são ilustrados nas figuras 4.27(b) e 4.28(a). Como é visível na figuras 4.27(a) e 4.27(b), a gama dos 0 - 800 Hz apresenta um elevado número de componentes espectrais características da avaria identificáveis, com algum destaque comparativamente ao espectro sonoro com rotor saudável.

Com o aumento do número de barras fraturadas no rotor nota-se um aumento das componentes espectrais associadas à avaria. Este incremento de barras fraturadas, também possibilitou a identificação de componentes espectrais na gama de frequência dos 200 aos 300 Hz, visíveis na figura 4.27b.

### Motor de indução trifásico alimentado por um variador de velocidade industrial

No que respeita às avarias nas barras do rotor quando o motor de indução trifásico é alimentado por um variador de velocidade industrial, com uma frequência de comutação de 12 kHz, observa-se um aumento de componentes espectrais identificáveis, associadas à avaria em análise, quando comparados com os resultados obtidos anteriormente para o mesmo tipo de avaria. Esse aumento ocorre tanto para avaria de uma barra, ilustrado nas figuras 4.29(a) e 4.30(a), como para a avaria em duas barras do rotor, figuras 4.29(b) e 4.30(b).

Analisando as figuras 4.29 e 4.30 verifica-se que apesar do aumento de componentes espectrais identificáveis, na gama de 0 - 800 Hz para uma avaria em apenas uma barra do rotor, há uma falta de destaque destas componentes espectrais relativamente ao sinal sonoro do rotor sem qualquer tipo de avaria. Também é visível que, com o incremento de barras fraturadas no rotor, o sinal sonoro obtido permite identificar mais componentes espectrais referentes à avaria.

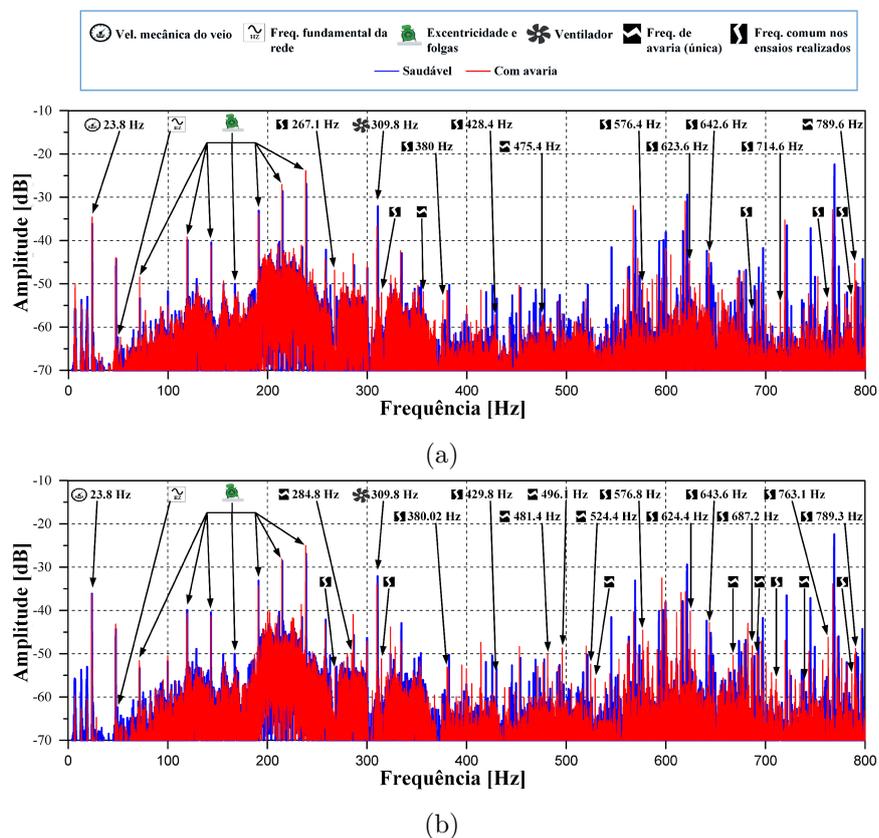


Figura 4.29: Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria nas barras do rotor: (a) 1 barra fraturada; (b) duas barras fraturadas.

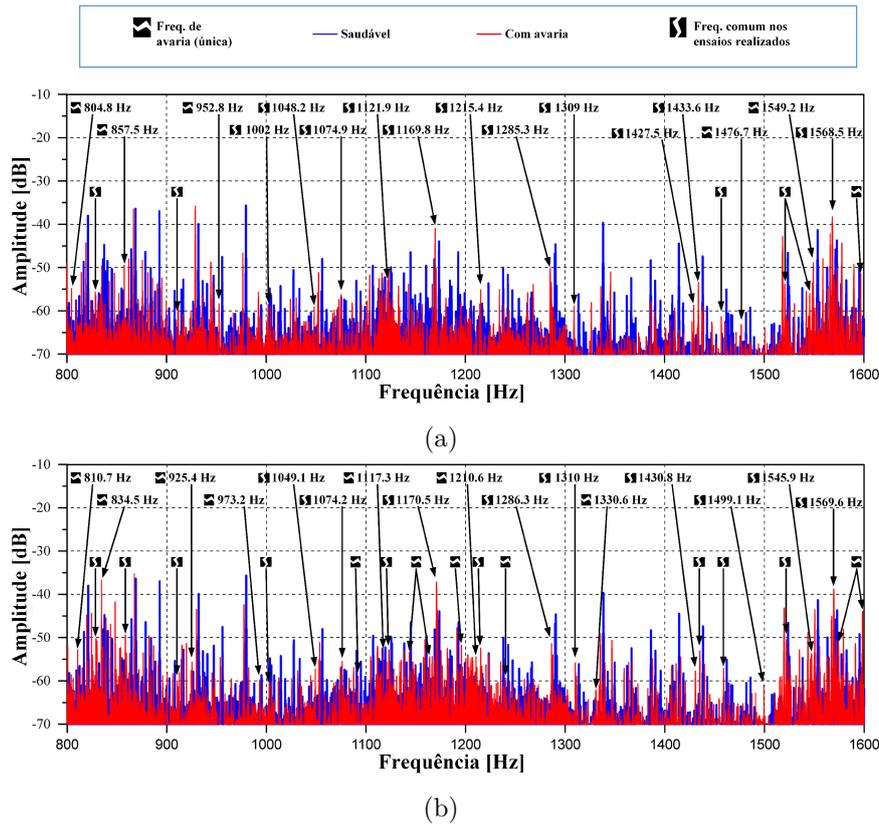


Figura 4.30: Espectros sonoros do motor ligado a um variador de velocidade e à plena carga, com avaria nas barras do rotor: (a) 1 barra fraturada; (b) duas barras fraturadas.

Em suma, a tabela 4.9 e tabela 4.10 apresentam os valores obtidos referentes ao nível sonoro contínuo equivalente ponderado A e ao nível sonoro máximo ponderado C, para os distintos esquemas de montagem aplicados ao motor de indução trifásico na presença de uma avaria nas barras do rotor. Os valores apresentados em ambas as tabelas demonstram um maior desconforto ao ouvido humano quando o rotor apresenta duas barras fraturadas.

Relativamente aos esquemas de montagem aplicados ao motor de indução, excetuando a situação de duas barras fraturadas, os valores de  $L_{eq\_A}$  e do  $L_{p\_C}$  são praticamente iguais. Verifica-se também que em ambos os esquemas de montagem, quanto maior o número de barras fraturadas maior os valores de  $L_{eq\_A}$  e do  $L_{p\_C}$ . No entanto, a situação que mais emite ruído sonoro é quando o motor de indução trifásico está alimentado diretamente da rede e contém duas barras fraturadas no rotor.

A obtenção destes valores,  $L_{eq\_A}$  e  $L_{p\_C}$ , também comprova a facilidade de distinção das componentes espectrais da avaria para maiores graus de severidade e tipo de avaria aplicado ao motor de indução, no entanto, o  $L_{eq\_A}$  e do  $L_{p\_C}$  não podem ser caracterizados unicamente como indicadores dos graus de severidade.

Tabela 4.9: Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para avaria nas barras do rotor e o motor de indução trifásico alimentado diretamente da rede.

<b>Funcionamento do motor à plena carga e avaria nas barras do rotor</b>			
<b>Medida/Ensaio</b>	<b>Saudável</b>	<b>1 Barra fraturada</b>	<b>2 Barras fraturada</b>
Leq_A[dB]	70.2	70.7	74.4
Lp_C[dB]	85.9	87.0	88.6

Tabela 4.10: Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para avaria nas barras do rotor e o motor de indução trifásico alimentado por um variador de velocidade industrial.

<b>Funcionamento do motor à plena carga e avaria nas barras do rotor</b>			
<b>Medida/Ensaio</b>	<b>Saudável</b>	<b>1 Barra fraturada</b>	<b>2 Barras fraturadas</b>
Leq_A[dB]	70.2	70.8	71.6
Lp_C[dB]	86.8	88.4	87.4

#### 4.2.4 Acionamento com controlo direto de binário e por orientação do campo rotórico

Nesta secção vai ser realizada uma análise aos espetros sonoros obtidos quando o motor de indução trifásico é sujeito a uma estratégia de controlo direto de binário e a uma estratégia de controlo por orientação do campo rotórico. Estes controlos foram implementados de acordo o esquema de montagem ilustrado na figura 4.31.

Neste esquema de montagem encontra-se um motor de indução trifásico de 3 kW, idêntico ao utilizado na secção da avaria nas barras do rotor, acoplado mecanicamente a um motor de indução trifásico de 7.5 kW, alimentado por um variador de velocidade industrial. Este motor de 7.5 kW irá servir de carga ao motor de 3 kW. O motor de indução trifásico objeto de ensaio, 3 kW, é controlado através de uma plataforma de controlo digital, em que estão implementadas as duas estratégias de controlo abordadas nesta secção ( controlo direto de binário e controlo por orientação do campo rotórico).

A tabela B.4 do anexo B apresenta as características dos motores de indução trifásicos anteriormente mencionados.

Para impor ao motor de indução trifásico de 3 kW o regime de funcionamento de carga, é controlado o variador de velocidade industrial que alimenta o motor de indução de 7.5 kW. Este variador de velocidade impõe a velocidade de rotação do conjunto, que é estabelecida pelo utilizador. A tabela 4.11 identifica a velocidade e frequência mecânica de rotação do rotor para cada regime de carga imposto para ambos os tipos de controlo.

A análise realizada aos espetros sonoros resultantes de cada medição efetuada, teve como ponto de partida deparar as diferenças que os tipos de controlo utilizados impunham no espetro, para diferentes regimes de carga. Como tal, para cada tipo de controlo foram impostos regimes de

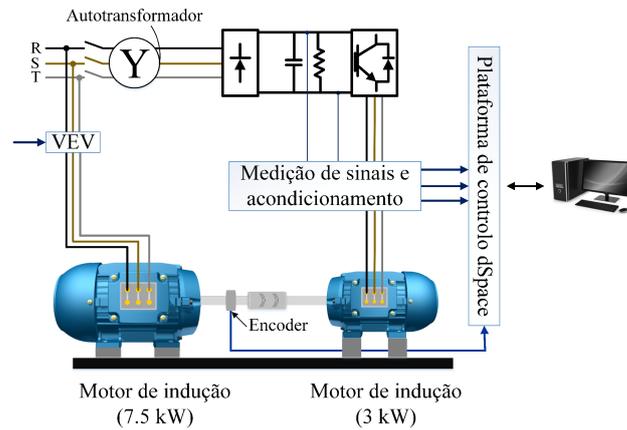


Figura 4.31: Motor de indução trifásico controlado por uma plataforma de controle digital dSPACE 1103.

funcionamento do motor de indução trifásico em vazio e à plena carga, sem qualquer tipo de avaria associada.

Foram também calculadas as frequências características das fontes de ruído habituais do motor de indução trifásico, de origem mecânica, origem aerodinâmica e origem eletromagnética, tal como a análise realizada para avaria nos rolamentos e nas barras do rotor.

Numa fase inicial é possível identificar um conjunto de frequências características provenientes de diferentes fontes de ruído. A velocidade mecânica de rotação do rotor continua a possuir um elevado destaque no espectro, a frequência fundamental imposta pela rede demonstra novamente a sua reduzida amplitude no espectro sonoro obtido. No entanto, ainda é possível identificar algumas componentes espectrais associadas a excentricidades e folgas. Uma vez que são utilizados dois motores de indução trifásicos com características nominais e físicas distintas são identificáveis duas componentes de espectrais de ventilação distintas. Tal acontece, porque o motor de indução trifásico de 3 kW possui treze pás no ventilador ao passo que, o motor de indução trifásico de 7.5 kW possui dez pás no ventilador.

Na figura 4.32 encontram-se identificadas as componentes espectrais das frequências características de diferentes origens, para ambos os regimes de carga e diferentes estratégias de controlo.

A figura 4.33 ilustra os espectros sonoros obtidos para as diferentes estratégias de controlo e regimes de carga impostos ao motor de indução trifásico. São identificadas as zonas características das bandas laterais em torno da frequência de comutação e seus harmónicos associados ao inversor

Tabela 4.11: Velocidade e frequência mecânica de rotação do rotor para diferentes regimes de carga e controlos.

Regime de carga	Velocidade (RPM)	Frequência mecânica do rotor (Hz)
Vazio	1300	21.6
Plena Carga	1300	21.6

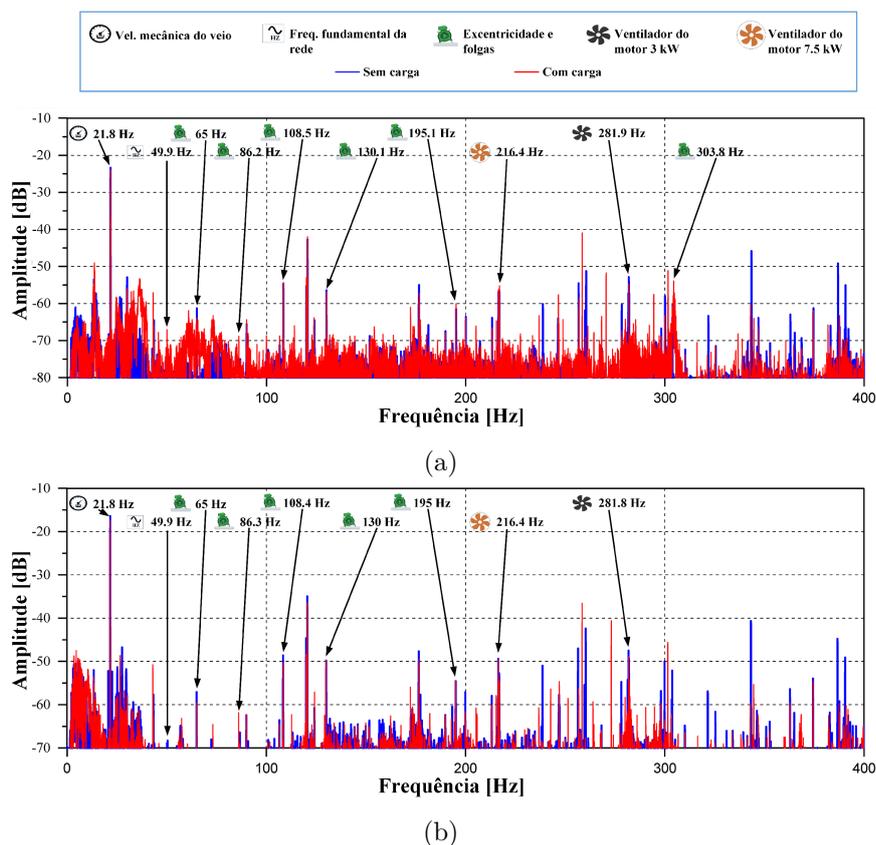


Figura 4.32: Espectros sonoros do motor para as diferentes estratégias de controlo: (a) controlo direto de binário; (b) controlo por orientação do campo rotórico.

presente na montagem e à frequência de comutação imposta pela estratégia de controlo utilizada. No controlo direto de binário esta frequência de comutação é variável ao longo do espectro ao passo que para o controlo por orientação do campo rotórico o seu valor é 18 kHz.

A tabela 4.12 apresenta os valores obtidos, para as diferentes estratégias de controlo, referentes ao nível sonoro contínuo equivalente ponderado A e ao nível sonoro máximo ponderado C.

Através da figura 4.33(a) e dos valores obtidos para o controlo direto de binário verifica-se que este é o controlo mais ruidoso a nível sonoro. Tal facto deve-se a uma maior presença de componentes espectrais dos 4000 Hz aos 10000 Hz, no controlo direto de binário, relativamente ao controlo por orientação do campo rotórico, ilustrado na figura 4.33(b).

Com o incremento de carga verifica-se que há uma diminuição dos valores  $L_{eq\_A}$  e do  $L_{p\_C}$ , uma vez que a frequência mecânica de rotação do rotor não variou para os diferentes regimes de carga. Uma justificação possível para estas reduções de valores são as interferências destrutivas do sinal quando associado o regime de plena carga, levando assim uma redução de ruído sonoro emitido pela máquina.

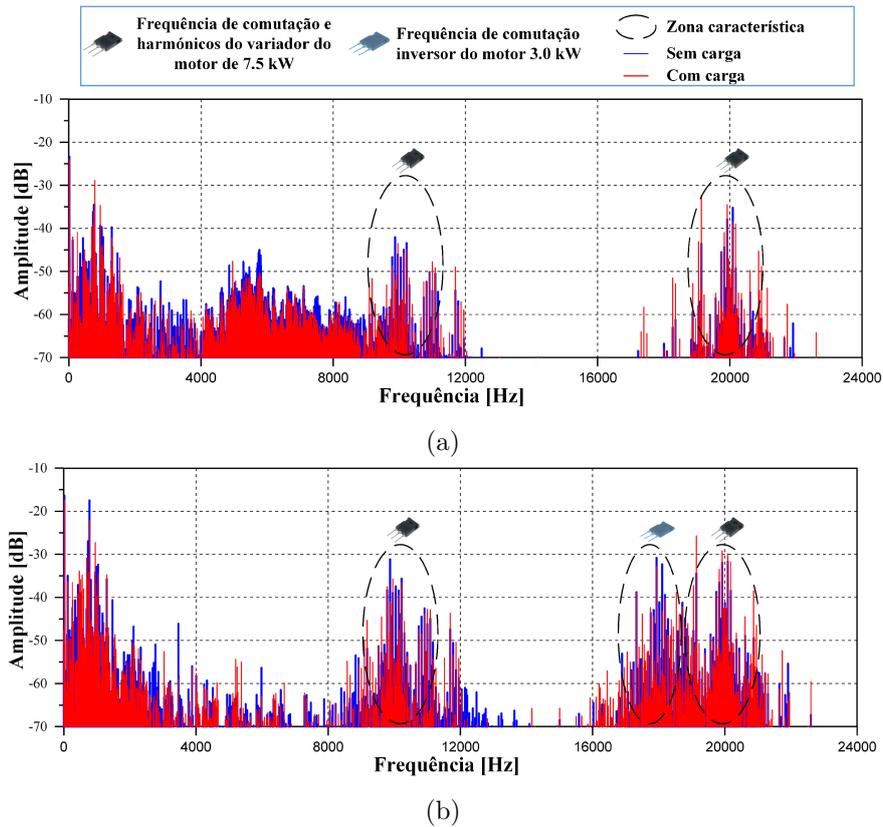


Figura 4.33: Espectros para acionamentos do tipo: (a) controlo direto de binário; (b) controlo por orientação do campo rotórico.

Tabela 4.12: Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para os diferentes ensaios realizados com o controlo direto de binário e com o controlo por orientação do campo rotórico.

<b>Funcionamento do motor de indução trifásico em vazio</b>		
<b>Medida/Controlo</b>	<b>Direto de binário</b>	<b>Orientação do campo rotórico</b>
Leq_A[dB]	74.2	66.1
Lp_C[dB]	87.4	78.8
<b>Funcionamento do motor de indução trifásico à plena carga</b>		
<b>Medida/Controlo</b>	<b>Direto de binário</b>	<b>Orientação do campo rotórico</b>
Leq_A[dB]	73.6	65.3
Lp_C[dB]	86.4	80.0

### 4.2.5 Medições em condições distintas

Nesta secção foram realizados ensaios com o motor de indução trifásico acoplado mecanicamente a um gerador de corrente contínua, em regime de funcionamento de vazio. O esquema de montagem utilizado é semelhante ao utilizado na secção das avarias nos rolamentos, no entanto, o motor utilizado nesta secção não apresenta qualquer tipo de avaria e foi alimentado diretamente da rede. A tabela B.1, do anexo B, apresenta as características dos equipamentos anteriormente mencionados.

A primeira condição distinta foi a posição do conjunto sonómetro mais microfone. Este conjunto foi colocado ao dobro da distância anteriormente utilizado. A figura 4.34 apresenta o espectro sonoro obtido para esta condição, em que foi realizada uma análise das componentes espectrais entre 0 e 400 Hz, de forma a identificar as componentes espectrais das diferentes fontes de ruído que surgem nesta gama de frequências. É de salientar que com esta mudança na posição do microfone é visível uma redução das amplitudes das componentes espectrais identificáveis, quando comparadas com as homólogas na figura 4.2a.

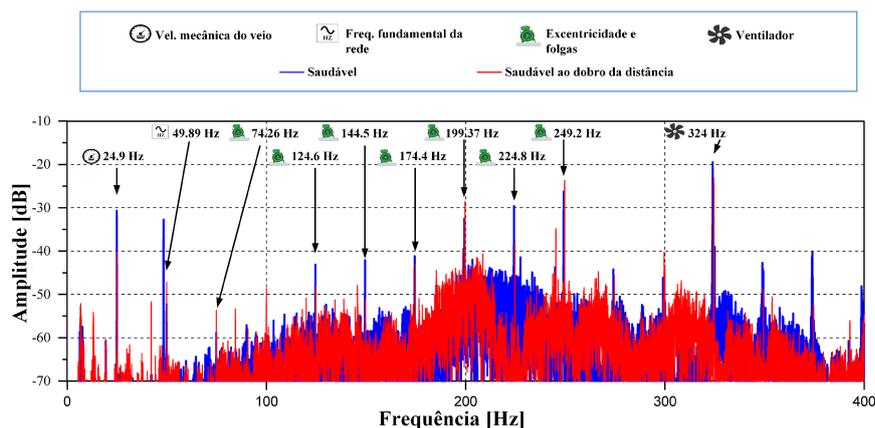


Figura 4.34: Espectro sonoro do motor obtido com o conjunto sonómetro mais microfone posicionado ao dobro da distância.

A tabela 4.13 apresenta os valores obtidos, com o sonómetro e microfone ao dobro da distância, referentes ao nível sonoro contínuo equivalente ponderado A e ao nível sonoro máximo ponderado C. Pode-se comprovar que com o dobro da distância há uma redução de quase 3 dB, valor este que vai contra o valor esperado de 6 dB. Uma justificação possível para esta discrepância é o facto da medição não ter sido realizada em campo livre mas sim numa sala prática e onde esta distância

Tabela 4.13: Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo para o conjunto do sonómetro mais microfone ao dobro da distância.

<b>Conjunto do sonómetro mais microfone posicionando ao dobro da distância.</b>		
<b>Medida/Ensaio</b>	<b>Saudável</b>	<b>Com o dobro da distância</b>
Leq_A[dB]	70.4	67.1
Lp_C[dB]	87.8	84.4

corresponde a uma zona reverberante.

A segunda condição distinta foi a realização de uma medição acústica para o mesmo esquema de montagem mas na presença de um fonte sonora externa. A figura 4.35 apresenta o espectro sonoro obtido para esta condição, onde novamente foi realizada uma análise das componentes espectrais entre 0 e 400 Hz, de forma a identificar as componentes espectrais das diferentes fontes de ruído que surgem nesta gama de frequências.

A tabela 4.14 apresenta os valores obtidos referentes ao nível sonoro contínuo equivalente ponderado A e ao nível sonoro máximo ponderado C, para esta condição.

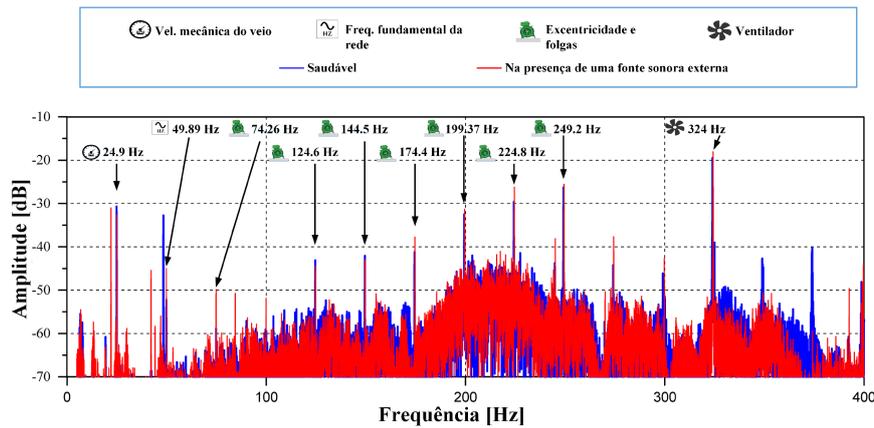


Figura 4.35: Espectro sonoro do motor obtido com uma fonte externa a emitir ruído acústico.

Tabela 4.14: Nível sonoro contínuo equivalente e nível sonoro máximo na presença de uma fonte sonora externa.

Funcionamento do motor em vazio(sem avaria) e com fonte sonora externa		
Medida/Ensaio	Saudável	Com o dobro da distância
Leq_A[dB]	70.4	71.0
Lp_C[dB]	87.8	87.5

# Capítulo 5

## Conclusão e trabalho futuro

### 5.1 Conclusão

O trabalho desenvolvido nesta dissertação consistiu na análise do ruído acústico emitido por motores de indução trifásicos, com o escopo de detetar potenciais falhas elétricas e mecânicas no mesmo, bem como analisar a influência que diferentes estratégias de controlo têm no ruído emitido pelos acionamentos em que este motor é utilizado.

As avarias estudadas nesta dissertação foram de natureza mecânica, com foco em avarias no anéis internos e anéis externos do rolamento oposto ao ataque e em gaiolas rotóricas com um número distinto de barras fraturadas. O impacto da alimentação de variadores eletrónicos de velocidade nos motores de indução trifásico também foi alvo de estudo nesta dissertação. Foi utilizado um variador de velocidade industrial com controlo escalar, em que foram usadas diferentes frequências de comutação para analisar a influencia em que estas possuem no espectro sonoro do motor de indução trifásico. Foram ainda aplicadas estratégias de controlo de acionamentos elétricos por controlo direto de binário e controlo por orientação de campo rotórico através de uma plataforma de controlo digital.

No que respeita ao estudo dos espectros sonoros obtidos verificou-se a possibilidade da identificação dos principais intervenientes na produção de ruído por parte do motor de indução trifásico notando-se o destaque do ruído de origem aerodinâmica, fonte de ruído predominante nos motores ensaiados, e a ausência de ruído de origem eletromagnética. A análise dos espectros permitiu também a identificação da velocidade de rotação do motor de indução trifásico.

Relativamente às avarias aplicadas ao motor não há um padrão definido que permita caracterizar o tipo de avaria e a sua severidade, uma vez que através dos espectros sonoros obtidos verificou-se que o som é um elemento suscetível de interferências externas. No entanto, quando introduzida uma avaria foi possível identificar algumas componentes espectrais características do tipo de avaria introduzida, em que o espectro sonoro obtido, refletia a modificação efetuada quando comparada com o motor sem qualquer tipo de avaria.

Nos espectros sonoros referentes às avarias dos rolamentos, verificou-se que o furo único de

2 mm no anel externo é a situação mais difícil de analisar, principalmente quando o motor de indução trifásico está alimentado por um variador de velocidade industrial. Tal facto devido à impossibilidade de distinção das componentes espectrais características da avaria, comparativamente ao espectro sonoro na situação saudável. Contudo, o espectro sonoro também demonstra que as avarias nos anéis internos possuem um maior realce relativamente às avarias nos anéis externos. Ainda é possível verificar que quanto maior for a severidade da avaria nos rolamentos, 2 ou 4 mm, maior é o destaque das componentes espectrais. O valor do nível sonoro contínuo equivalente reflete-se proporcionalmente no grau de severidade e do tipo de avaria.

O regime de plena carga quando introduzido permitiu, excetuando a avaria de 2 mm no anel externo do rolamento quando alimentado diretamente da rede, a uma melhor identificação das componentes espectrais associadas às avarias nos anéis dos rolamentos. Também foi possível comprovar a relação que o ruído de origem aerodinâmico possui com o regime de carga.

Na avaria de rotores com barras fraturadas, quando introduzidos no motor de indução trifásico, é visível a distinção das componentes espectrais relativamente ao espectro sonoro do motor na situação saudável. Esta distinção reflete-se tanto para um rotor com uma barra fraturada como para um rotor com duas barras fraturadas. O aumento do número de barras fraturadas do rotor também é acompanhado pelo o aumento de componentes espectrais identificáveis características deste tipo de avaria, como também do aumento do nível sonoro contínuo equivalente.

Quando um motor de indução trifásico faz parte de um acionamento elétrico de velocidade variável, o ruído acústico emitido é superior comparativamente ao emitido na situação em que o motor de indução trifásico está alimentado diretamente da rede. Para além das componentes espectrais já existentes quando este é alimentado diretamente da rede, surgem outras componentes associadas à frequência de comutação do inversor que está alimentar o motor de indução trifásico, um conjunto de bandas laterais em torno da frequência de comutação e múltiplos desta que vão provocar a nível sonoro uma situação mais ruidosa. Com os ensaios realizados, tornou-se perceptível a elevada influência que a frequência de comutação tem no espectro sonoro resultante, tornando este parâmetro num dos mais influentes na emissão de ruído sonoro.

No caso da estratégia de controlo direto de binário há um conjunto de harmónicos e componentes espectrais na faixa dos 4000 aos 12000 Hz que se situa numa zona em que o ouvido humano é mais sensível e como tal provoca um ruído bastante audível e desagradável, como foi verificado nos ensaios realizados. Relativamente ao controlo por orientação de campo rotórico, a frequência de comutação é aos 18 kHz o que faz com que as componentes espectrais da frequência de comutação e os seus harmónicos situem-se numa gama mais alta de frequências, e como tal perturba menos o ouvido humano. De uma forma geral, o controlo por orientação de campo rotórico torna-se mais agradável ao ouvido humano e menos ruidoso que o controlo direto de binário.

Assim sendo, com a realização deste trabalho pode-se concluir que o ruído acústico emitido

pelos motores de indução trifásicos podem ser utilizados como uma técnica alternativa aos sistemas de monitorização convencionais, na deteção de avarias. Mas para tal é preciso fazer uma análise rigorosa ao ambiente que circunda o motor de indução trifásico, senão torna-se desadequada a utilização desta técnica em ambientes onde não se consiga isolar as fontes emissoras de ruído acústico.

## 5.2 Trabalho futuro

As principais sugestões para trabalho futuro são:

- a implementação de técnicas avançadas de processamento de sinal ao sinal obtido pelo sonómetro, com o fim de comparar os diferentes resultados obtidos e eleger a melhor técnica para o diagnóstico das avarias no motor de indução trifásico;
- a realização de ensaios com motores com seis ou mais polos de forma a visualizar o impacto do ruído de origem eletromagnética;
- a implementação de um sistema de medição recorrendo a um conjunto de microfones em torno da máquina alvo de ensaios;
- analisar as frequências características das avarias com a interferência das outras fontes sonoras;
- a realização dos ensaios num ambiente anecoico.



# Referências

- [1] K. Saad and G. Mirzaeva, “Fault diagnosis of induction motors by space harmonics analysis of the main air gap flux,” in *IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany, pp. 1608–1613, 2014.
- [2] F. Salazar-Villanueva and O. G. Ibarra-Manzano, “Spectral analysis for identifying faults in induction motors by means of sound,” in *IEEE International Conference on Electronics, Communications and Computing (CONIELECOMP)*, Cholula, Mexico, pp. 149–153, 2013.
- [3] M. El Hachemi Benbouzid, “A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 984–993, 2000.
- [4] S. Bistafa, *Acústica aplicada ao controle do ruído*. Edgard Blücher, 2006.
- [5] A. Peterson and E. Gross, *Handbook of Noise Measurement*. General Radio Company, 1972.
- [6] J. Thiemann and P. Kabal, “Low distortion acoustic noise suppression using a perceptual model for speech signals,” in *IEEE Workshop Proceedings Speech Coding*, pp. 172–174, 2002.
- [7] C. G. Le Prell, C. Spankovich, E. Lobarinas, and S. K. Griffiths, “Extended high frequency thresholds in college students: Effects of recreational noise,” *Journal of the American Academy of Audiology*, vol. 24, no. 8, pp. 725–739, 2013.
- [8] K. Rogers, *Ear, nose, and throat*. Britannica Educational Publishing, 2012.
- [9] M. Kleiner, *Acoustics and Audio Technology: Third Edition*. J. Ross Publishing, 2011.
- [10] I. Kirk, L. H., “Engineering controls for noise attenuation in the cement industry,” in *IE-EE/PCA, Cement Industry Technical Conference*, Rapid City, United States, pp. 343–358, 1998.
- [11] J. Foreman, *Sound Analysis and Noise Control*. Springer US, 2012.
- [12] S. Nau and H. Mello, “Acoustic noise in induction motors: causes and solutions,” in *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference.*, San Antonio, United States, pp. 253–263, 2000.

- [13] B. . Kjær, *Environmental Noise*. Brüel & Kjær, 2000.
- [14] J. P. Cowan, *Handbook of Environmental Acoustics*. John Wiley and Sons, 1993.
- [15] L. Landau and E. Lifshitz, *Física estadística, Volume 5*. Reverté, 1988.
- [16] D. Bies and C. Hansen, *Engineering Noise Control: Theory and Practice, Third Edition*. Taylor & Francis, 2003.
- [17] J. Benford, J. Swegle, and E. Schamiloglu, *High Power Microwaves, Third Edition*. CRC Press, 2015.
- [18] D.-J. Kim, J.-W. Jung, J.-P. Hong, K.-J. Kim, and C.-J. Park, “A study on the design process of noise reduction in induction motors,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 4638–4641, 2012.
- [19] J. Gieras, C. Wang, and J. Lai, *Noise of Polyphase Electric Motors*. CRC Press, 2005.
- [20] ABB, *Low voltage motors - motor guide*. ABB, 2014.
- [21] R. Lach and S. Soter, “Measuring method for determining the reasons of magnetically caused structure-borne sound on electrical drive systems,” in *IEEE European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden, Germany, pp. 10 –pp, 2005.
- [22] W. Finley, “Noise in induction motors-causes and treatments,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, no. 6, pp. 1204–1213, 1991.
- [23] S. Mizuno, S. Noda, M. Matsushita, T. Koyama, and S. Shiraishi, “Development of a totally enclosed fan-cooled traction motor,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1508–1514, 2013.
- [24] A. Binojkumar, B. Saritha, and G. Narayanan, “Acoustic noise characterization of space-vector modulated induction motor drives an experimental approach,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3362–3371, 2015.
- [25] C. G. Nistor, G. Scutaru, I. Peter, and O. I. Plesa, “Determination of magnetic noise for a 7.5 kw three-phase induction motor fed directly from the grid,” in *IEEE International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Bran, Romania, pp. 431–436, 2014.
- [26] R. Curiac and S. Singhal, “Causes and reduction techniques of electromagnetic noise in induction motors,” in *IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC '09)*., Birmingham, United States, pp. 39–44, 2009.

- [27] T. Kobayashi, F. Tajima, M. Ito, and S. Shibukawa, “Effects of slot combination on acoustic noise from induction motors,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, no. 2, pp. 2101–2104, 1997.
- [28] B. . Kjær, *Vibration Diagnostics for Industrial Electric Motor Drives*. Brüel & Kjær, 1988.
- [29] T. Wolbank and P. Macheiner, “Comparison of different methods to detect static air gap asymmetry in inverter fed induction machines,” in *IEEE 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems( PEDS '07)*., Bangkok, Thailand, pp. 675–680, 2007.
- [30] O. Vitek, M. Janda, and V. Hajek, “Effects of eccentricity on external magnetic field of induction machine,” in *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON*, Valletta, Malta, pp. 939–943, 2010.
- [31] D. Dorrell, W. Thomson, and S. Roach, “Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 1, pp. 24–34, 1997.
- [32] W. Tong, *Mechanical Design of Electric Motors*. CRC Press, 2014.
- [33] M. J. Crocker, *Handbook of Acoustics*. Wiley, 1998.
- [34] G. Kliman, W. Premerlani, R. Koegl, and D. Hoeweler, “A new approach to on-line turn fault detection in ac motors,” in *IEEE Conference Record of the Industry Applications (IAS '96)*., vol. 1, San Diego, United States, pp. 687–693, 1996.
- [35] H. Akcay and E. Germen, “Subspace-based identification of acoustic noise spectra in induction motors,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 1, pp. 32–40, 2015.
- [36] A. Singhal and M. A. Khandekar, “Bearing fault detection in induction motor using fast fourier transform,” in *IEEE Int. Conf. on Advanced Research in Engineering & Technology*, 2013.
- [37] M. Janda, O. Vitek, and V. Hajek, *Noise of Induction Machines*. INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [38] W. R. Finley and M. M. Hodowanec, “Sleeve versus antifriction bearings: selection of the optimal bearing for induction motors,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 909–920, 2002.
- [39] H. Toliyat and G. Kliman, *Handbook of Electric Motors*. CRC Press, 2004.
- [40] 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, no. 3, pp. 735–739, 2004.

- [41] M. Gonçalves, “Técnicas avançadas de processamento de sinal no diagnóstico de avarias em rolamentos de motores de indução trifásicos,” Master’s thesis, DEEC, UC, 2015.
- [42] M. J. Goncalves, R. C. Creppe, E. G. Marques, and S. M. Cruz, “Diagnosis of bearing faults in induction motors by vibration signals - comparison of multiple signal processing approaches,” in *IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Buzios, Brasil, pp. 488–493, 2015.
- [43] 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, no. 1, pp. 244–251, 2010.
- [44] P. Alger, “The magnetic noise of polyphase induction motors [includes discussion],” *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 73, no. 1, 1954.
- [45] K. Huang, Z. Liu, H. Li, J. Yang, D. Turner, L. Jiang, and Q. Wu, “Reduction of electromagnetic noise in three-phase induction motors,” in *IEEE International Conference on Power System Technology*, vol. 2, pp. 745–749, 2002.
- [46] S. B. Lee, J. Yang, J. Hong, J.-Y. Yoo, B. Kim, K. Lee, J. Yun, M. Kim, K.-W. Lee, E. Wiedenbrug, and S. Nandi, “A new strategy for condition monitoring of adjustable speed induction machine drive systems,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 2, pp. 389–398, Feb 2011.
- [47] A. Malfait, R. Reekmans, and R. Belmans, “Audible noise and losses in variable speed induction motor drives with igt inverters-influence of the squirrel cage design and the switching frequency,” in *IEEE Conference Record of the Industry Applications*, Denver, United States, pp. 693–700 vol.1, 1994.
- [48] ABB, *The Motor Guide - basic technical information about low voltage standard motors*. ABB, 2005.
- [49] W. Lo, C. Chan, Z. Zhu, L. Xu, D. Howe, and K. Chau, “Acoustic noise radiated by pwm-controlled induction machine drives,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 4, pp. 880–889, Aug 2000.
- [50] I. Tsoumas, H. Tischmacher, and B. Eichinger, “Influence of the number of pole pairs on the audible noise of inverter-fed induction motors: Radial force waves and mechanical resonances,” in *IEEE International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany, pp. 1811–1817, 2014.

- 
- [51] R. Strzelecki, J. Kukluk, B. Hawrylak, and M. Klytta, “Acoustic effects of motor supplied by various vsi inverters,” in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE '99)*., Bled, Eslovenia, pp. 31–36 vol.1,1999.
- [52] WEG, *Technical guide – Induction motors fed by PWM frequency inverters*. WEG.
- [53] J. Agostinho, “Diagnóstico de avarias nos rolamentos de um motor de indução trifásico,” Master’s thesis, DEEC, UC, 2013.



# Anexo A

## Limites de potência sonora de acordo com a IEC 60034-9

Tabela A.1: Nível de potência sonora ponderado *A* máximo, expresso em dB no regime de funcionamento do motor em vazio.

Potência Nominal $P_N$ (kW)	8 polos		6 polos		4 polos		2 polos	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
$1.0 < P_N \leq 2.2$	70	71	70	71	70	71	78	85
$2.2 < P_N \leq 5.5$	73	76	73	76	73	76	83	88
$5.5 < P_N \leq 11$	77	80	77	80	78	81	88	91
$11 < P_N \leq 22$	81	84	81	84	85	88	91	94
$22 < P_N \leq 37$	84	87	84	87	88	91	93	100
$37 < P_N \leq 55$	86	90	87	91	91	95	95	101
$55 < P_N \leq 110$	89	93	91	95	95	98	97	104
$110 < P_N \leq 220$	94	97	96	99	99	102	100	107
$220 < P_N \leq 440$	96	98	98	101	102	105	103	109
$440 < P_N \leq 1000$	97	99	99	102	105	108	105	110
$1000 < P_N$	Por acordo contratual							

**Nota 1:** Para velocidade única do motor de indução trifásico com rotor em gaiola IC01, IC11, IC21, IC411, IC511 e IC611.



## Anexo B

# Características dos equipamentos utilizados nos ensaios

Tabela B.1: Equipamento utilizado nos ensaios realizados para as avarias nos rolamentos.

Equipamento	Características	
	Fabricante	WEG
	Tensão (V)	400/690 ( $\Delta/Y$ )
	Corrente elétrica (A)	6.15/3.57 ( $\Delta/Y$ )
	Frequência (Hz)	50
	Potência (kW)	3
	Número de polos	4
	Velocidade nominal (rpm)	1440
	Fator de potência nominal	0.8
Número de pás do ventilador	13	
Gerador de corrente contínua	Fabricante	AEG
	Tensão (V)	220
	Corrente elétrica (A)	17
	Frequência (Hz)	50
	Potência (kW)	3 (Motor) / 4 (Gerador)
	Número de polos	4
Velocidade nominal (rpm)	1450	
	Fabricante	ABB
	Modelo	ACS 355
	Controlo selecionado	Escalar
	Frequência de comutação (kHz)	12

Tabela B.2: Equipamento utilizado nos ensaios realizados para a avaria nas barras do rotor.

Equipamento	Características	
	Fabricante	WEG
	Tensão (V)	400/690 ( $\Delta/Y$ )
	Corrente elétrica (A)	6.15/3.57 ( $\Delta/Y$ )
	Frequência (Hz)	50
	Potência (kW)	3
	Número de polos	4
	Velocidade nominal (rpm)	1440
	Fator de potência nominal	0.8
	Número de pás do ventilador	13
Gerador de corrente contínua	Fabricante	AEG
	Tensão (V)	220
	Corrente elétrica (A)	17
	Frequência (Hz)	50
	Potência (kW)	3 (Motor) / 4 (Gerador)
	Número de polos	4
	Velocidade nominal (rpm)	1450
	Fabricante	ABB
	Modelo	ACS 355
	Controlo selecionado	Escalar
	Frequência de comutação (kHz)	4, 8, 12 e 16
	Frequência de operação (Hz)	20, 35 e 50

Tabela B.3: Equipamento utilizado nos ensaios realizados para a variação da frequência de comutação e de operação.

Equipamento	Características	
	Fabricante	WEG
	Tensão (V)	400/690 ( $\Delta/Y$ )
	Corrente elétrica (A)	6.47/3.75 ( $\Delta/Y$ )
	Frequência (Hz)	50
	Potência (kW)	3
	Número de polos	4
	Velocidade nominal (rpm)	1400
	Fator de potência nominal	0.81
	Número de pás do ventilador	13
Gerador de corrente contínua	Fabricante	AEG
	Tensão (V)	220
	Corrente elétrica (A)	17
	Frequência (Hz)	50
	Potência (kW)	3 (Motor) / 4 (Gerador)
	Número de polos	4
	Velocidade nominal (rpm)	1450
	Fabricante	ABB
	Modelo	ACS 355
	Controlo selecionado	Escalar
	Frequência de comutação (kHz)	12

Tabela B.4: Motores utilizados para o acionamento com controlo direto de binário e por orientação do campo rotórico.

	Fabricante	WEG
	Tensão (V)	400/690 ( $\Delta/Y$ )
	Corrente elétrica (A)	6.47/3.75 ( $\Delta/Y$ )
	Frequência (Hz)	50
	Potência (kW)	3
	Número de polos	4
	Velocidade nominal (rpm)	1400
	Fator de potência nominal	0.81
	Número de pás do ventilador	13
	Fabricante	WEG
	Tensão (V)	400/690 ( $\Delta/Y$ )
	Corrente elétrica (A)	13.9/8.06 ( $\Delta/Y$ )
	Frequência (Hz)	50
	Potência (kW)	7.5
	Número de polos	4
	Velocidade nominal (rpm)	1465
	Fator de potência nominal	0.86
	Número de pás do ventilador	10