



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Luís Filipe Santos Marques

DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS PARA MONITORIZAÇÃO
DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO DE MÁQUINAS: APLICAÇÃO
À PREVISÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE AERONAVES

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Física, ramo de Instrumentação,
orientada pelo Professor Doutor António Miguel Lino Santos Morgado e PhD Fernando António dos Santos Simões
e apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2019

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Luís Filipe Santos Marques

**Desenvolvimento de algoritmos para monitorização da
condição de operação de máquinas: aplicação à
previsão de falha de rolamentos de aeronaves**

*Dissertação apresentada à Universidade de Coimbra para
cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Física.*

Orientadores:

Professor Dr. António Miguel Lino Santos Morgado

*Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra,
Rua Larga, 3004-516. Coimbra, Portugal*

PhD Fernando António dos Santos Simões

*Active Space Technologies S.A., Parque Industrial de Taveiro, Lote 12, 3045-508 Coimbra,
Portugal*

Coimbra,
Setembro de 2019

Este trabalho foi desenvolvido em colaboração com:

Departamento de Física, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra (FCTUC)



Active Space Technologies S.A.



Agradecimentos

A realização de um trabalho de investigação como projeto para a Tese de Mestrado em Engenharia Física assinala a proximidade do final de uma etapa de relevo para qualquer estudante do Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Em primeiro lugar à Active Space Technologies por concretizar o meu sonho enquanto estudante de participar num projeto empresarial durante o meu último ano do Mestrado Integrado em Engenharia Física. A todos os seus colaboradores agradeço todo o companheirismo, ótima integração nesta instituição e ainda os ensinamentos dados durante estes longos 12 meses. Agradeço ainda ao professor José Paulo Domingues toda ajuda que deu para a realização deste estágio, seja pela resolução da burocracia e incentivo neste estágio seja pelos ensinamentos na área da Engenharia.

Agradeço ao meu orientador Fernando Simões por todo o apoio que me deu na realização deste projeto, evidenciando semana após semana uma vontade incessante de ajuda e interesse no desenvolvimento deste trabalho. Ao professor António Miguel Morgado, que embora mais distante fisicamente, sempre se demonstrou disponível para dar a sua opinião sobre o trabalho realizado assim como fazer sugestões pertinentes para o sucesso deste projeto.

Aos meus amigos, David, Jorge, Talisca, Sampaio, Oliveira, Faria, Barbosa, Filó, Bruna, Joana Teixeira e Joana Marques que foram a minha companhia durante estes últimos 5 anos. Um enorme obrigado por fazerem parte destes meus verdes negros anos e os tornarem um pouco mais claros, com todas as conversas, jantares e noitadas que tivemos e todos os momentos académicos que vivemos e alcançamos.

Ao Silva, Damas, Pequeno, Mário e Reigota agradeço a amizade de secundário que perdura até hoje, repleta de momentos de convívio e boa disposição que vos caracteriza, pelo apoio que têm dado durante todos estes anos e contribuírem para a pessoa que sou hoje.

Aos meus "irmãos" Daniel, Gonçalo, David, André e Carol quero agradecer todo o carinho e amizade que demonstraram durante estas quase duas décadas. Desde os tempos da pré-primária até ao dia de hoje partilhamos muitas memórias e momentos que fazem

destas amizades únicas e singulares. Todas estas memórias que vivenciamos todos juntos ou que por vezes com apenas alguns de vós enriqueceram a minha pessoa seja na infância, fase da adolescência ou agora no início da vida adulta. Espero sinceramente que continuemos a partilhar histórias, jantares, conversas e também as noites de copos pois desta forma alimentaremos e fortaleceremos ainda mais a nossa amizade para que continue a ser forte, duradoura e única.

Por último, a toda a minha família que desde o dia do meu nascimento marcou sempre presença em todas as minhas conquistas, sejam elas pessoais, académicas ou até mesmo religiosas. Um enorme obrigado por me acompanharem nestes 23 anos de vida e por todo o apoio, carinho e incentivo que dão sempre que alcanço uma nova etapa. Aos meus pais Virgílio e Goreti e ao meu irmão João Pedro o maior dos obrigados por acreditarem em mim, pela confiança e encorajamento diário na decisão tomada há cinco anos de ser Engenheiro Físico. Agradeço-vos todas viagens que fizemos em família que possibilitaram o conhecimento, a convivência e a aprendizagem de novas culturas que me enriquecem como ser humano e me ajudam a crescer com uma melhor visão do mundo que me rodeia.

A todos, um enorme OBRIGADO!

COIMBRA, 16 de Setembro de 2019

LUÍS FILIPE SANTOS MARQUES

Resumo

Os rolamentos são das componentes mais utilizadas em máquinas rotativas, como motores ou geradores elétricos de aeronaves, sendo componentes que se degradam rapidamente. Sendo uma das maiores causas de avarias de máquinas, a monitorização da condição de operação dos rolamentos assume um papel importante para reduzir o impacto das falhas.

Com o avanço tecnológico e industrial, as aeronaves requerem mais energia elétrica face às exigências dos seus sistemas eletrónicos e dos próprios passageiros. Para produzir maiores quantidades de energia, os geradores elétricos das aeronaves podem atingir velocidades de rotação de 30 000 RPM, o que significa que a degradação dos rolamentos será muito rápida. Para evitar avarias graves, reduzir o número de acidentes em aeronaves, a perda de vidas humanas e os custos de manutenção, pretende-se implementar um sistema de monitorização que indique uma previsão do momento em que os rolamentos irão falhar.

Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo que monitorize a condição dos rolamentos utilizados na próxima geração de geradores e acionadores de partida de aeronaves para previsão de falhas com uma antecedência de pelo menos 100 horas de voo e um grau de confiança de 0,997 (3σ).

Os rolamentos foram testados num equipamento dedicado e os sinais das termorresistências (RTDs), acelerómetros e sensores de emissão acústica foram adquiridos, processados e armazenados através de um protótipo desenvolvido pelo consórcio do projeto. A cada minuto de aquisição o algoritmo determina um valor para cada *condition indicator* (CI) implementado e constrói séries de valores com a dimensão da duração do teste. Os CIs, como por exemplo o valor eficaz (RMS), a curtose, o desvio padrão ou o fator de crista, são calculados quer no domínio dos tempos quer no das frequências de forma a que a previsão de falhas seja mais robusta. No domínio das frequências são ainda analisadas as frequências naturais do rolamento a partir dos sinais dos acelerómetros e dos sensores de emissão acústica de forma a determinar a localização da falha.

Através das séries de valores de cada CI determinou-se que, para os testes de 6000 e 12000 RPM, as previsões de falha ocorrem com uma antecedência de 114 e 843 minutos, respetivamente, e com três desvios padrão (3 sigma) de confiança. A conversão entre tempo de teste e de operação nominal do rolamento foi realizada através da equação L_{10} , determinando-se para a situação máxima de carga aplicada que as previsões dos testes de

6000 e 12000 RPM correspondem a 1268 e 6720 horas, respetivamente. Adicionalmente, o algoritmo determinou que as falhas presentes nos rolamentos se localizavam no anel interior como se comprovou pela observação dos rolamentos no final de cada teste.

Apesar da validade da equação L_{10} para a conversão para tempo nominal não estar completamente estabelecida, os tempos de previsão de falha determinados são uma ordem de grandeza superiores ao requisito do projeto. A margem de segurança entre os dois valores permite ter confiança no algoritmo para previsão de falhas em rolamentos com uma antecedência de pelo menos 100 horas de voo e um grau de confiança de 0,997. Além disso, o algoritmo consegue determinar qual a região do rolamento que está degradada, resultado que acrescenta valor ao algoritmo, aumentando as hipóteses de ser implementado nos sistemas de monitorização de aeronaves.

Palavras-chave: Rolamentos, monitorização de condição, algoritmo de prognóstico, condition indicators (CIs), previsão de falhas, grau de confiança de 0,997 (3σ).

Development of algorithms for machine condition monitoring: application to aircraft bearing failure prediction

Abstract

Bearings are among the most commonly used components in rotating machinery, namely engines and electric generators in aircraft, known to degrade quicker. As a major cause of machine malfunctions, condition monitoring (CM) of bearings plays an important role reducing their failure rate.

With technological and industrial progress, aircraft require more electricity to comply with demands from their electronic systems and passengers as well. To increase energy production, shafts of aircraft electrical generators can rotate up to 30,000 RPM, which means that bearing degradation will be quicker. To avoid severe malfunctions, reduce the number of aircraft accidents, minimize loss of human lives and maintenance costs, it is intended to implement a monitoring system that provides reliable forecasting of bearings failure.

The goal of this project is to develop an algorithm that monitors the condition of bearings that will be included in next generation of generators and starters of aircraft. This monitoring capability will be used to predict failures with at least 100 hours in advance and a statistical significance of 0.997 (3σ).

Sets of bearings were tested in dedicated equipment and signals from resistance temperature detectors (RTDs), accelerometers and acoustic emission sensors were acquired, processed and stored using a mock-up developed by the consortium. Every minute, the algorithm acquires data and determines a value for each condition indicator implemented, building a series of values with the test duration extension. Specific CIs, namely root mean square (RMS), kurtosis, standard deviation or crest factor, are calculated both in the time and frequency domains so that fault prediction is more robust. In the frequency domain, the bearing natural frequencies are also analysed from the accelerometer signals and acoustic emission sensors in order to determine the fault position.

Through the series of values of each CI it was determined that, for the 6000 and 12000 RPM tests, the failure predictions occur, respectively, 114 and 843 minutes in advance with a level of significance of three standard deviations (3 sigma). The conversion between the accelerated test and nominal operating is performed using L_{10} equation, yielding

1268 and 6720 hours for 6000 and 12000 RPM, respectively. Additionally, the algorithm determined that bearing failures were located in the inner ring, in agreement with post-mortem analysis of the bearings.

Although validity of the L_{10} equation for time conversion is yet not fully established, the estimates achieved are about one order of magnitude greater than project requirements. The safety margin between the two values carries confidence in the algorithm for bearing failure prediction with an advance of at least 100 hours and a statistical significance of 0.997. Another characteristic that adds value to this algorithm is the fact that it can determine which region of the bearing is degraded, increasing the chances of being implemented in aircraft monitoring systems.

Keywords: *Bearings, condition monitoring (CM), prognosis algorithm, condition indicators (CIs), failure prediction, statistical significance of 0.997 (3σ).*

Índice

Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract	x
Índice	xii
Lista de Acrónimos	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Análise de requisitos	4
1.4 Apresentação da empresa	4
1.5 Cronograma do projeto	5
1.6 Organização da dissertação	6
2 Estado da arte	7
2.1 O que é o <i>condition monitoring</i> ?	7
2.2 Porque é tão importante fazer <i>condition monitoring</i> ?	9
2.3 Processamento de sinal	11
2.4 Algoritmos implementados em <i>condition monitoring</i>	13
2.5 Eletrónica para ambientes hostis	14
2.6 Serviços para <i>condition monitoring</i>	15
3 Montagem experimental	19
3.1 Sensores	19
3.1.1 <i>Resistance Temperature Detectors (RTDs)</i>	20
3.1.2 Acelerómetros	21

3.1.3	Sensores de Emissão Acústica	22
3.2	Integração	23
3.3	<i>Mock-up</i>	24
3.4	Equipamento de teste	27
3.5	Testes	29
3.5.1	Teste de 6000 RPM	30
3.5.2	Teste de 10000 RPM	30
3.5.3	Teste de 12000 RPM	31
4	Análise de dados	33
4.1	Análise preliminar	33
4.1.1	Séries	34
4.1.2	Valor eficaz (RMS)	34
4.1.3	Curtose	38
4.2	Análise avançada	40
4.2.1	Domínio do tempo	41
4.2.2	Domínio das frequências	43
4.2.2.1	Detecção de falhas	44
4.2.2.2	Identificação do tipo de falha	46
5	Discussão	53
5.1	Domínio do tempo	53
5.2	Domínio das frequências	54
5.3	Validação do algoritmo	61
6	Conclusão	65
6.1	Trabalho futuro	66
	Referências bibliográficas	69
	Apêndices	75
A	Códigos Matlab	77

Lista de Acrónimos

- AE** Acoustic Emission.
ANFIS Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System.
ANN Artificial Neural Network.
AST Active Space Technologies.
- BPFI** Ball Pass Frequency Inner (race).
BPFO Ball Pass Frequency Outer (race).
BSF Ball Spin Frequency.
- CAGR** Compound Annual Growth Rate.
CBM Condition-Based Maintenance.
CE Comissão Europeia.
CFE Cage Fault Frequency.
CI Condition Indicator.
CM Condition Monitoring.
CNN Convolutional Neural Network.
CWT Continuous Wavelet Transform.
- DTF** Discret Fourier Transform.
- EMD** Empirical Mode Decomposition.
- FFT** Fast Fourier Transform.
FPT First Predicting Time.
- GaAs** Gallium Arsenide.
GPR Gaussian Process Regression.
- HI** Health Indicator.
- IA** Intelência Artificial.
- MTTF** Mean-Time-To-Failure.
- RMS** Root Mean Square.
RMTTF Reduced Mean-Time-To-Failure.

RPM Rotações por Minuto.

RTD Resistance Temperature Detector.

RUL Remaining Useful Lifetime.

SiC Silicon Carbide.

SOI Silicon on Insulator.

STFT Short-Time Fourier Transform.

SVM Support Vector Machine.

USD United States Dollar.

WT Wavelet Transform.

Lista de Figuras

1.1	Previsão do valor de mercado do <i>condition monitoring</i> de máquinas. [1] . . .	1
1.2	Desenvolvimento característico de uma falha mecânica [3].	3
1.3	Cronograma do projeto proposto (azul) e principais modificações (vermelho) feitas durante a execução do projeto iBearing.	5
1.4	Distribuição inicial das tarefas a serem executadas durante o período da tese.	6
2.1	Estratégias de manutenção de equipamentos [6].	8
2.2	Efeito do <i>condition monitoring</i> em diferentes indústrias e aplicações [13]. . .	10
2.3	Estimativa do instante em que o parâmetro medido excede o valor de limiar (<i>threshold</i>) [8].	11
2.4	Gama de temperaturas de materiais semicondutores [26].	15
2.5	Gráfico da curtose do sinal de vibração do rolamento em função do tempo de teste [25].	16
3.1	Princípio de funcionamento da emissão acústica [33].	19
3.2	Esquema de um RTD com uma configuração de 4 fios [34].	21
3.3	<i>Sleeve</i> integrada com o rolamento, sensores, cabos e conectores [35].	24
3.4	Esquema com as principais unidades da <i>mock-up</i> [35].	25
3.5	Diagrama de blocos do sistema de aquisição e processamento de sinal [35]. .	26
3.6	Ilustração da <i>mock-up</i> com referência às unidades mais relevantes do sistema [35].	27
3.7	Interface gráfica da <i>mock-up</i> usada pelo utilizador (esquerda) e pelo administrador (direita) [35].	27
3.8	Equipamento de teste do iBearing [35].	28
3.9	<i>Sleeve</i> (esquerda), rolamento (centro) e motor do <i>test rig</i> integrado com a <i>sleeve</i> , rolamento, sensores e respetivos cabos e conectores (direita) [35]. . .	28
3.10	Esquema de um rolamento aplicado na indústria aeronáutica.	29
4.1	Gráficos do valor RMS do sinal em função do tempo de duração do Teste de 6000 RPM para os sensores de temperatura.	36
4.2	Gráficos do valor RMS em função do tempo para os acelerómetros e sensores de emissão acústica para o Teste de 6000 RPM.	37

4.3	Gráfico do valor da curtose em função do tempo de duração do Teste de 6000 RPM para os sinais de temperatura.	39
4.4	Gráficos do valor da curtose do sinal em função do tempo para os acelerômetros e sensores de emissão acústica para o Teste de 6000 RPM.	40
4.5	Gráfico do valor RMS do sinal diferença de temperaturas em função do tempo de duração do Teste de 12000 RPM.	41
4.6	Gráficos do valor RMS do sinal em função do tempo para acelerômetros e sensores de emissão acústica para o Teste de 12000 RPM.	42
4.7	Gráficos do valor RMS do sinal em função do tempo nas bandas de frequência, 1 – 40 kHz (acelerômetros) e 30 – 150 kHz (sensores de emissão acústica) para o Teste de 6000 RPM.	45
4.8	Gráficos do valor RMS do sinal em função do tempo nas bandas de frequência, 1 – 40 kHz (acelerômetros) e 30 – 150 kHz (sensores de emissão acústica) para o Teste de 12000 RPM.	46
4.9	Geometria típica de um rolamento de esferas [44].	47
4.10	Representações gráficas das amplitudes das frequências naturais do rolamento em função do tempo para o sensor AC3 e Teste de 6000 RPM.	49
4.11	Representações gráficas das amplitudes das frequências naturais do rolamento em função do tempo para o sensor AE8 e Teste de 6000 RPM.	50
4.12	Representações gráficas das amplitudes das frequências naturais do rolamento em função do tempo para o sensor AC3 e Teste de 12000 RPM.	50
4.13	Representações gráficas das amplitudes das frequências naturais do rolamento em função do tempo para o sensor AE8 e Teste de 12000 RPM.	51
5.1	Análise de todas as frequências com os diferentes sensores para o Teste de 6000 RPM.	56
5.2	Análise de todas as frequências com os diferentes sensores para o Teste de 12000 RPM.	57
5.3	Características de falha dos rolamentos dos Testes de 6000 e 12000 RPM [35].	58
5.4	Representações gráficas do rácio entre as amplitudes das frequências do anel externo (esquerda) e interno (direita) e a amplitude da frequência do eixo de rotação.	61

Lista de Tabelas

2.1	Tempos de falha dos rolamentos com defeitos no anel exterior [25].	16
3.1	Principais características dos Resistance Temperature Detectors (RTDs) adequados ao projeto iBearing.	20
3.2	Principais características dos acelerómetros escolhidos.	22
3.3	Principais características dos sensores de emissão acústica.	23
3.4	Taxas de amostragem de cada conjunto de sensores.	26
3.5	Dimensões do rolamento de 19 esferas (C30XF1910GY12).	30
3.6	Parametrização do Teste de 6000 RPM.	30
3.7	Parametrização do Teste de 10000 RPM.	31
3.8	Parametrização do Teste de 12000 RPM.	31
4.1	Tabela com as frequências naturais de um rolamento de 19 esferas para diferentes velocidades de rotação do equipamento de teste, fornecida pela Barden (Schaeffler).	48
5.1	Coefficientes de correlação para o Teste 0.	59
5.2	Coefficientes de correlação para o Teste 6.	59
5.3	Valores de carga nominais aplicadas e respetiva carga equivalente.	63
5.4	Tempos de previsão de teste e nominais do início da falha do rolamento nos Testes de 0 e 6 para as diferentes situações de carga.	63

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

As avarias que se verificam em máquinas rotativas, motores e geradores elétricos, têm sido ao longo dos tempos uma das principais preocupações de diversas indústrias como as da aeronáutica, automóvel, naval, química, petrolífera e militar. De modo a reduzir cada vez mais o número de avarias sucedidas e conseqüentemente os custos de reparação, este tipo de indústrias procura ter um maior investimento em sistemas de monitorização da condição (CM do inglês Condition Monitoring) de máquinas. No gráfico da figura 1.1, uma pesquisa da Maximize Market Research sobre o mercado de monitorização de condição de máquinas, podemos ver que se prevê que o valor investido pelas indústrias aumente continuamente nos próximos anos. Estima-se que o mercado irá crescer a uma taxa anual composta (em inglês Compound Annual Growth Rate (CAGR)) de 6,3% durante os próximos sete anos, atingindo o valor 3,77 mil milhões ¹ de dólares (USD) em 2026.



Figura 1.1: Previsão do valor de mercado do *condition monitoring* de máquinas. [1]

¹Nos Estados Unidos da América, 1 bilião = 10^9 , enquanto em Portugal 1 bilião = 10^{12}

No entanto, apesar das vantagens verifica-se que existe uma restrição no crescimento do mercado da monitorização da condição de rolamentos. Além de serem muito caros e tecnicamente limitados, os sistemas disponíveis no mercado para monitorizar a condição de rolamentos requerem intervenção humana para a análise de dados e tomada de decisão o que significa que é essencial um especialista para executar estas tarefas. Esta restrição no mercado da monitorização está também associada à incapacidade destes sistemas suportarem condições ambientais adversas assim como de serem apenas adequados à manutenção periódica.

Adicionalmente, verifica-se que as aeronaves modernas requerem cada vez mais energia eléctrica a bordo. Para isso, as possibilidades são aumentar ou a velocidade de rotação ou as dimensões dos geradores atuais que, neste caso, implicaria um acréscimo da sua massa. Deste modo, considera-se que aumentar a velocidade de rotação é a melhor opção, que pode aproximar-se das 30 000 RPM implicando uma degradação mais acelerada do rolamento [2].

Face a estas limitações dos sistemas de *Condition Monitoring (CM)* e às exigências energéticas das aeronaves, a Thales, empresa francesa sediada em Paris, que comercializa sistemas de informação e serviços para as indústrias aeroespacial, de defesa e de segurança apresentou o projeto iBearing à Comissão Europeia (CE) no âmbito do Programa Clean Sky. O objetivo do projeto iBearing consistia no desenvolvimento, fabrico, teste e validação de um sensor para auxiliar na monitorização da degradação estrutural dos rolamentos durante a sua vida útil. Depois de observar o tema do projeto e os principais objetivos que este visava alcançar, a Active Space Technologies (AST) propôs-se a desenvolver o projeto iBearing em consórcio com a Universidade de Cranfield e a empresa alemã Schaeffler. Nesta proposta, cada um dos membros do consórcio liderou atividades específicas do projeto. A AST coordenou o projeto e desenvolveu as ações relacionadas com os sensores e todas as unidades eletrónicas. A Universidade de Cranfield ficou responsável pela análise de dados, avaliação dos Condition Indicators (CIs) e desenvolvimento do algoritmo. Finalmente, a Schaeffler forneceu os rolamentos e realizou o conjunto de testes num equipamento de teste apropriado. Todas estas atividades foram executadas em coordenação com a Thales Avionics Electrical Systems, responsável pela definição dos requisitos do projeto.

A nível pessoal, durante o meu percurso académico no Departamento de Física da Universidade de Coimbra sempre ambicionei a possibilidade de desenvolver um projeto que tivesse relativa importância para a sociedade, nomeadamente, participar no desenvolvimento de um produto ou serviço que não fosse puramente académico e sem aplicabilidade no mundo real. Com o aproximar da conclusão do curso procurei concretizar o que mais ambicionava como estudante. Após uma conversa com o engenheiro físico João Pedro Neto da AST, na primeira Feira de Emprego organizada pelo Núcleo de Estudantes do Departamento de Física, fiquei interessado em realizar um projeto numa das áreas de experiência da Active Space. Ao apresentar-me o projeto iBearing como uma das opções de

estágio de Verão disponíveis, onde os objetivos eram analisar os dados do projeto, verificar a existência de padrões e tendências e detetar a presença de falhas em rolamentos, a Active Space Technologies possibilitou a concretização deste sonho. Concluído o estágio e concretizados os objetivos inicialmente propostos, concluiu-se que era interessante continuar com o trabalho desenvolvido associando-o a um projeto final de curso. Deste modo, surgiu o projecto de mestrado "Desenvolvimento de algoritmos para monitorização da condição de operação de máquinas: aplicação para previsão de falhas de rolamentos de aeronaves".

Antes de iniciar a análise de dados é sempre importante consolidar o modo de funcionamento de uma máquina e a forma como esta se degrada com o tempo de utilização para que a análise seja crítica e possibilite retirar conclusões válidas. Numa fase inicial de operação os rolamentos apresentam um estado normal de condição que sofre alterações com o tempo após serem sujeitos a rotações contínuas. Os primeiros indícios de degradação neste tipo de componentes estão associados ao aumento da vibração sentida pelos rolamentos, que se acentua consoante a sua condição normal de funcionamento vai diminuindo. Posteriormente, devido à intensificação da vibração sentida pelos rolamentos, começam a ser removidos pequenos fragmentos destes elementos que originam o aparecimento de pequenas fissuras. Ao serem removidos, estes fragmentos passam a ser constituintes dos líquidos de lubrificação implicando um aumento significativo da fricção existente entre dois elementos adjacentes.

A evolução da degradação pode ser comprovada primeiro através da análise dos líquidos de lubrificação, já que é possível verificar a presença de fragmentos do rolamento no óleo lubrificante, e posteriormente pela análise de som, pois o sinal de vibração ao atravessar as fissuras presentes nos rolamentos emite sons de altas frequências. A utilização contínua de um componente degradado provoca um aquecimento no sistema onde está inserido que pode ser detetado, através do toque, ou recorrendo a sensores de temperatura. É frequente numa fase final da degradação ocorrer emissão de fumo em máquinas avariadas que continuem em funcionamento. Após o momento de rutura (*Break down*), as máquinas deixam de estar operacionais o que implica a reparação ou substituição das mesmas. Na figura 1.2 observa-se a diminuição da condição de componentes de máquinas durante o seu período de funcionamento assim como as várias fases de deteção de falhas e respetivo tempo útil de funcionamento da máquina.

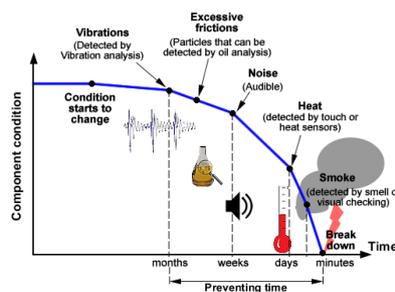


Figura 1.2: Desenvolvimento característico de uma falha mecânica [3].

1.2 **Objetivos**

Este projeto tem como principal objetivo o desenvolvimento de um algoritmo para previsão de falhas de rolamentos com uma antecedência de pelo menos 100 horas de voo e um grau de confiança de 0,997, isto é, 3 sigma, em condições ambientais adversas (ambientes sujeitos a altas temperaturas e vibração). A implementação deste algoritmo tem de ser válida para diferentes condições de operação em simultâneo com restrições de hardware a serem determinadas posteriormente.

1.3 **Análise de requisitos**

Durante o desenvolvimento do projeto iBearing foram estabelecidos requisitos que deviam ser cumpridos de modo a concretizar os objetivos propostos. Estes requisitos consistiam em: sistema capaz de funcionar a 150 °C, onde 135 °C seria o valor mínimo aceitável; equipamento de teste capaz de rodar com velocidades até 30 000 RPM; tempo médio entre falhas do sistema (MTTF) de 500 000 h; e rolamentos constituídos por esferas cerâmicas.

Relativamente ao desenvolvimento do algoritmo para monitorização de condição com aplicação para previsão de falhas em rolamentos também foram estabelecidos alguns requisitos. Os principais foram a previsão de falhas com uma antecedência de pelo menos 100 h de voo e um grau de confiança de 3 sigma. Foram ainda considerados outros requisitos, como por exemplo, o espaço de memória ocupado não exceder os 10 MBytes, repetição do algoritmo ao fim de 5 minutos e CIs que validassem a deteção da falha com o grau de confiança pretendido.

1.4 **Apresentação da empresa**

Como foi referido anteriormente, o presente trabalho foi desenvolvido em colaboração com a empresa Active Space Technologies S.A. ([4]) que desenvolve projetos para o setor espacial, aeronáutico, nuclear e industrial. Esta empresa fundada em 2004 tem como atividades principais a instrumentação espacial, sistemas de controlo térmico e estrutural para aplicações no espaço, a monitorização de ambientes adversos e sistemas de controlo para aplicações aeroespaciais, sistemas de manuseamento remoto para ambientes perigosos e com radiação e sistemas automatizados para a indústria. A Active Space Technologies já desenvolveu vários projetos na área de aeronáutica, destacando-se os seguintes: Active Gurney Flap, TelemHarsh, RTMGear, iBearing e iGear. O projecto Active Gurney Flap tinha como objectivo a monitorização de vibração em pás de helicóptero, enquanto os projetos TelemHarsh e RTMGear visavam o desenvolvimento da comunicação de dados e energia entre as partes fixas e móveis de eixos de rotação. O projeto iGear encontra-se a decorrer e tem por objectivo o desenvolvimento de sistemas de monitorização para detectar a degradação antecipada de rolamentos e engrenagens de caixas de velocidades. Algum desenvolvimento do projeto iGear tem por base trabalho anterior realizado para o

iBearing. Deste modo, o presente projeto tem ramificações não só para o iBearing, mas também para o iGear, bem como para outros projetos previstos para o futuro a médio prazo.

1.5 Cronograma do projeto

Nesta secção são apresentadas as distribuições de tarefas a realizar quer pelo consórcio durante o desenvolvimento do projeto iBearing quer pelo aluno durante o período de realização do projeto de mestrado. Na figura 1.3 podemos observar o cronograma de todo o projeto iBearing, a azul o que foi inicialmente proposto e a vermelho as principais modificações que foram feitas durante o período de desenvolvimento.

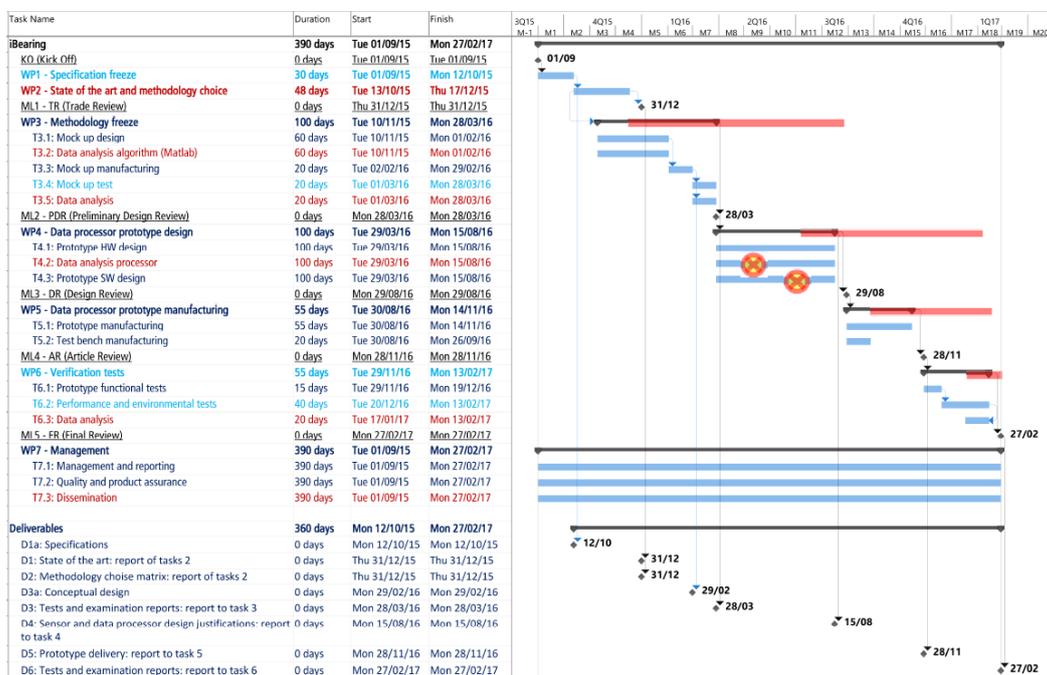


Figura 1.3: Cronograma do projeto proposto (azul) e principais modificações (vermelho) feitas durante a execução do projeto iBearing.

Na figura 1.4 encontra-se a proposta de tarefas a realizar durante o projeto de tese de mestrado. É importante referir que a tarefa 6, Intelência Artificial (IA), encontra-se marcada a cor diferente, verde, por ser uma tarefa opcional sendo apenas realizada se se considerasse vantajosa para o projeto e existisse tempo suficiente para a executar de forma a apresentar resultados conclusivos.

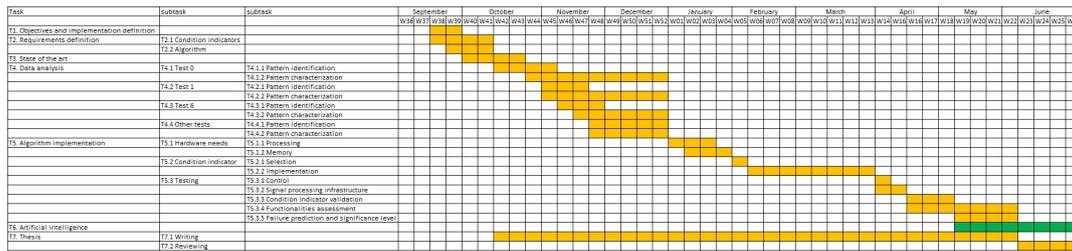


Figura 1.4: Distribuição inicial das tarefas a serem executadas durante o período da tese.

1.6 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo, Introdução, é apresentada a motivação que justificou o desenvolvimento deste trabalho, os objetivos que este visa alcançar e os requisitos a cumprir, bem como uma contextualização da instituição onde o projeto foi realizado e o programa de tarefas a satisfazer.

No capítulo 2, Estado da arte, é descrito o que é o *condition monitoring* e a importância que tem no panorama industrial. São ainda apresentados os sinais que são mais frequentemente analisados e diferentes algoritmos implementados para fazer *condition monitoring*. Na parte final do capítulo descreve-se o que são ambientes hostis e as implicações que estes têm relativamente à eletrónica a utilizar, assim como, os serviços já existentes no mercado para realizar a monitorização da condição de máquinas ou de outros produtos industriais, como por exemplo os rolamentos.

O terceiro capítulo, Montagem experimental, apresenta-nos detalhadamente todo o equipamento utilizado durante o desenvolvimento do projeto iBearing. Nesta fase, descreve-se o tipo de sensores selecionados e as suas principais características e o sistema de condicionamento e processamento de sinal. Além disso, é também referido o equipamento onde foram realizados todos os testes de longa duração para estudar a evolução da degradação da estrutura de um rolamento. No final do capítulo é feita uma breve descrição dos três testes analisados e são sumarizadas as condições em que foram executados.

Posteriormente, no capítulo 4 (Análise de dados) são apresentadas as diferentes metodologias aplicadas na realização deste trabalho assim como os resultados mais relevantes que foram obtidos para cada um dos testes realizados e é feita uma breve análise dos mesmos.

No quinto capítulo, Discussão, são discutidos de forma pormenorizada e objetiva todos os resultados alcançados e anteriormente apresentados.

Por fim, o capítulo 6 sumariza as principais conclusões retiradas da realização deste projeto e enumera as propostas dos procedimentos que devem ser aplicados num futuro próximo.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 O que é o *condition monitoring*?

Condition monitoring consiste num processo de verificação e monitorização periódica ou contínua de parâmetros que caracterizam o estado físico de uma máquina, como por exemplo temperatura e vibração, enquanto esta está em modo de operação, com objetivo de fazer o diagnóstico e previsão de falhas [5, 6]. O conceito de manutenção de equipamentos, mesmo que de forma instintiva, surge desde que o Homem começou a desenvolver tecnologia. Contudo o modo como tem sido feita tem evoluído ao longo dos tempos.

Inicialmente, a forma como a manutenção era feita baseava-se na estratégia *run-to-break*, ou seja, as máquinas eram colocadas a trabalhar até avariarem. Quando as falhas ocorriam, podiam ser catastróficas e originar danos graves quer na própria máquina que tinha avariado quer noutras que estivessem conectadas. Da implementação desta estratégia, muitas das vezes resultavam grandes perdas de produção que resultavam da reparação demorada dos componentes danificados, elevados custos de manutenção ou acidentes humanos graves já que nesta situação a manutenção era feita de emergência e de forma não planeada [5–8]. Atualmente, esta estratégia continua a ser utilizada, tipicamente, por indústrias que utilizem um grande número de máquinas de pequenas dimensões, como por exemplo as máquinas de costura, em que a avaria de uma durante um pequeno período de tempo não tem consequências graves na produção [5].

Com a necessidade de evitarem avarias catastróficas em equipamentos e por isso protegerem os seus bens, as indústrias adotaram uma estratégia de prevenção que estivesse previamente planeada. Assim, surgiu a manutenção preventiva periódica, em inglês *Time-Based Preventive Maintenance*, que consiste na substituição de equipamentos em intervalos regulares mais curtos que o tempo previsto entre falhas consecutivas. Esta estratégia implicava que fossem feitas manutenções mesmo quando os sistemas estavam em bom estado e a funcionar normalmente. Por isso os custos de manutenção aumentavam significativamente pois as indústrias gastavam parte do seu capital de forma desnecessária [5–8].

2.1. O que é o condition monitoring?

Após a manutenção era muito frequente aparecerem falhas em equipamentos, que estavam associadas a serviços mal executados pelos funcionários, frustrados por passarem grande parte do tempo a fazer manutenção de peças que estavam em perfeitas condições [5, 7].

Posteriormente, começou a ser aplicada a manutenção baseada na condição dos equipamentos, Condition-Based Maintenance (CBM), também designada por manutenção preditiva, pois através da CBM é feita a previsão da potencial avaria da máquina, possibilitando a reparação da mesma num período adequado [5, 8]. Este tipo de monitorização pode ser feito de duas formas distintas: direta ou indiretamente. A direta é feita através da inspeção visual, técnica mais simples do CM, que consiste na observação a olho nú ou com o auxílio de um instrumento ótico das condições da máquina. Já a monitorização indireta é feita pela análise de sinal, como por exemplo a análise da temperatura, vibração ou do óleo de lubrificação do sistema [6, 9]. Na figura 2.1 podemos observar as várias formas de fazer manutenção que acabamos de apresentar.

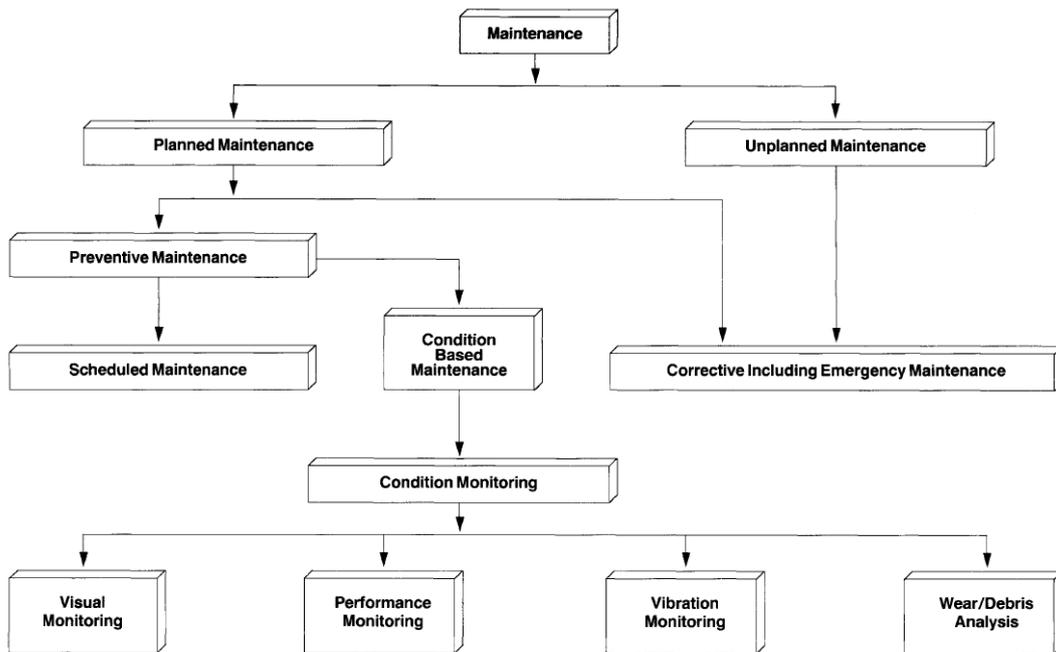


Figura 2.1: Estratégias de manutenção de equipamentos [6].

Durante o período da Segunda Guerra Mundial, houve desenvolvimentos importantes na indústria aeronáutica, nomeadamente a utilização dos primeiros motores a jato. Com esta invenção o número de voos aumentou e invariavelmente acidentes graves começaram a verificar-se, como foram os casos dos ocorridos com os aviões de Havilland Comet utilizados entre 1952 e 1954 [10]. Assim, surgiu por parte das indústrias aeronáuticas a necessidade de monitorizar o estado de operação dos equipamentos de forma a evitarem avarias catastróficas que causassem acidentes graves e perda de vidas humanas. Deste modo, julga-se que o CM dos rolamentos utilizados nesta indústria tenha surgido durante

este período ainda que, inicialmente, fosse uma técnica rudimentar.

Apesar da frequência de acidentes na indústria aeronáutica ser cada vez menor pela evolução dos sistemas de monitorização, ainda é comum ocorrerem avarias que originam catástrofes. Isto acontece porque a variabilidade é uma característica do ser humano que limita um desempenho perfeito destes sistemas. Na história existem vários registos de acidentes que ocorreram devido a ações humanas mal desempenhadas, seja em manutenções de equipamentos que posteriormente avariaram seja em incorretas interpretações dos sistemas de controlo. Um exemplo de um acidente causado por uma manutenção incorreta é o da aeronave B18616, Boeing 737-800 da companhia aérea chinesa que se incendiou no dia 20 de agosto de 2007 no aeroporto de Naha-Okinawa, Japão. Este incêndio iniciou-se quando o combustível que vazou através de um buraco presente no bordo de ataque (*slat*) da asa direita entrou em contato com superfícies do motor que estavam a temperaturas muito elevadas. O relatório do acidente considera que a origem da perfuração deste bordo frontal está relacionada com os trabalhos de manutenção realizados um mês e meio antes do acidente para evitar o enfraquecimento da porca que fixa este bordo. Devido ao difícil local de acesso, a queda da anilha provocou a queda da porca e consequentemente do conjunto de ancoragem, que ao ser pressionado contra o bordo perfurou-o [11].

2.2 Porque é tão importante fazer *condition monitoring*?

Ao serem utilizadas num modo normal de funcionamento é frequente surgirem nas máquinas pequenos defeitos inerentes ao desgaste físico cumulativo que as suas estruturas são sujeitas. Ao continuarem em funcionamento apesar de existirem esses pequenos defeitos, a condição das máquinas deteriora-se ainda mais e os pequenos defeitos agravam-se dando origem a avarias graves. Assim, fazer CM é extremamente importante já que desta forma acompanhamos a natural evolução do estado físico das máquinas durante o seu tempo de funcionamento. Através deste acompanhamento observam-se os pequenos defeitos que surgem e a forma como estes evoluem até ao instante em que as componentes danificadas sejam reparadas/substituídas de forma a evitar danos catastróficos que comprometam o funcionamento de todo o sistema onde estão inseridas. Deste modo, fazer CM permite reduzir os custos de manutenção, por minimizar o número de manutenções de máquinas que são efetivamente necessárias e eliminar as desnecessárias, e evitar a ocorrência de falhas catastróficas. Para além disso, como o CM também indica qual é a natureza e a gravidade da falha que posteriormente será reparada, é possível reduzir a perda de produção e dessa forma aumentar a produtividade pois o tempo de intervenção que será necessário para reparar a máquina pode ser determinado previamente, otimizando-se este processo [6, 7, 12]. Na figura 2.2 podemos observar o efeito do CM em aplicações de diversas indústrias relativamente ao custo de manutenção dos equipamentos. Da observação desta figura, verificamos que fazer CM permite reduzir bastante o capital dispendido pelas indústrias na reparação e substituição dos seus equipamentos danificados.

<i>Industry</i>	<i>Application</i>	<i>Savings due to predictive maintenance (PM)</i>
Defence	Navy	The Canadian Navy estimates average savings of \$2m/annum through the use of PM across its fleet of destroyers
Metals	Aluminium mill	ALCOA saved \$1.1m in 1992 in motor repairs alone
Metals	Steel works	Armco Steel saves some \$12m/annum through PM
Metals	Steel mill	Unplanned repair of a failed 1000 hp motor bearing cost \$79k before PM; planned repair of same motor after PM identified potential bearing failure: \$1.6k
Petrochemical	Oil production	Introduction of PM reduced gas turbine compressor maintenance outages by 20% and eliminated the associated lost production cost of 1100 barrels of crude oil per hour
Petrochemical	Oil refinery	An oil refinery produced nearly \$1m/year savings by reducing maintenance costs by 29% on 100 major and 3900 minor machines
Power	Co-generation	On average, maintenance of co-generation plant costs \$7/hp; one western Texas facility has reduced theirs to \$3.5/hp through PM
Power	Nuclear	Following installation of PM in 1985, a nuclear power plant estimated its first-year savings were \$2m, second-year savings were \$3.5m
Power	Utilities	An Electric Power Research Institute study compared the actual costs of maintenance in N. American utilities: run-to-failure, \$18/hp; periodic, \$13/hp; predictive, \$9/hp
Pulp and paper	Paper and board converter	Company specializing in high-value coating of plastic film and paper saved \$40k within three months of installing PM
Pulp and paper	Paper and board mill	Georgia Pacific Paper saved \$72k on one machine outage when PM detected a pump problem

Figura 2.2: Efeito do *condition monitoring* em diferentes indústrias e aplicações [13].

Os rolamentos são as componentes mais utilizadas em máquinas rotativas e têm como principal função minimizar a fricção existente entre duas superfícies adjacentes que se estejam a movimentar com velocidades diferentes. Para além de serem uma das principais componentes deste tipo de máquinas, os rolamentos caracterizam-se por degradarem muito rapidamente o que significa que grande parte das avarias que ocorrem em máquinas rotativas provêm de danos em rolamentos [12, 14, 15]. Devendiran e Manivannan ([16]) indicam que 30% das falhas verificadas em máquinas rotativas provêm de rolamentos danificados. Assim, de modo a diminuir o número de falhas com origem em rolamentos, é cada vez mais pertinente prever o instante em que o rolamento irá falhar. A previsão de

falhas é um processo que se baseia no estado atual do rolamento e nas suas flutuações ao longo do tempo para estimar em que região do rolamento haverá degradação, qual o instante em que a falha ocorrerá e ainda a sua natureza [17]. Neste processo, o instante em que se prevê o aparecimento da falha é determinado com base num valor de limiar (*threshold*), ou seja, considera-se que o rolamento está danificado quando o valor estimado atinge este valor de limiar, como podemos observar na figura 2.3. O conhecimento prévio deste instante permite que haja uma melhor preparação da substituição do rolamento, impedindo a propagação dos danos para outros componentes e evitando avarias graves no sistema.

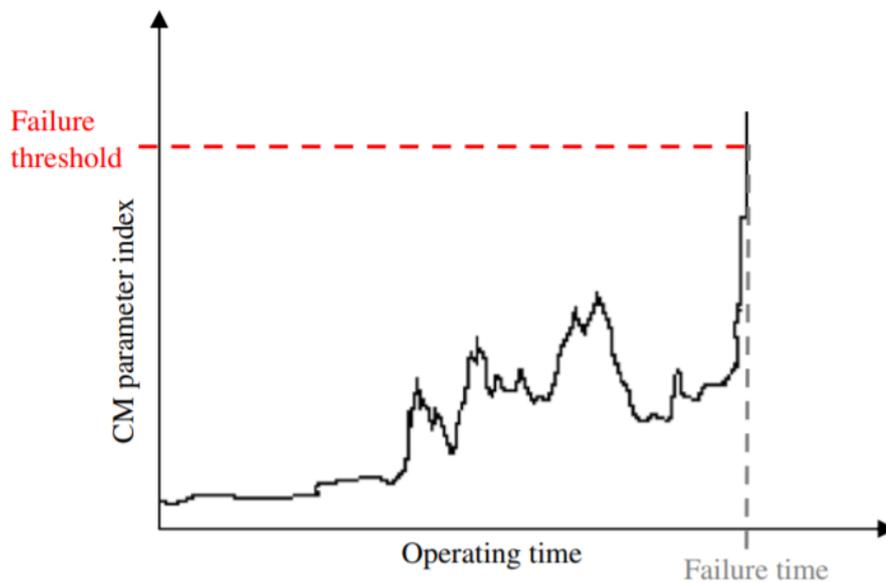


Figura 2.3: Estimativa do instante em que o parâmetro medido excede o valor de limiar (*threshold*) [8].

2.3 Processamento de sinal

Como foi referido na secção 2.1, o CM de rolamentos pode ser feito direta ou indiretamente. O CM feito de forma indireta consiste na observação e análise de sinais de modo a caracterizar o estado de operação dos rolamentos. A principal técnica de CM e com melhores resultados é a medição da vibração, pois identifica com precisão 90% das falhas que ocorrem em máquinas [16]. Contudo fazer a monitorização da temperatura do rolamento também é importante uma vez que a temperatura aumenta consideravelmente com a presença de falhas nestes elementos [9].

Quando estão em rotação, os rolamentos são sujeitos a grandes tensões, pelo movimento dos elementos rolantes (esferas) nas pistas, que provocam a fadiga das suas estruturas metálicas. Em contínua rotação, este desgaste acentua-se e começam a surgir abaixo da superfície pequenas fendas que se propagam progressivamente até à superfície das

pistas dos rolamentos. Pela passagem das esferas nas posições onde se localizam estas fendas, pequenos fragmentos da superfície do anel são retirados, provocando um aumento nas dimensões e profundidade das fissuras. Conseqüentemente a vibração sentida pelos rolamentos também aumenta [7, 12]. Assim, para se obterem medidas da vibração dos rolamentos recorre-se a dois tipos de sensores: os acelerômetros e os sensores de emissão acústica (Acoustic Emission (AE)). Os acelerômetros são sensores que são utilizados para medir a vibração dos rolamentos em baixas frequências, tipicamente inferiores a 40 kHz [9], enquanto os sensores AE medem as altas frequências do sinal de vibração, geralmente para valores entre 100 kHz e 1 MHz [18, 19]. Num rolamento saudável a maioria da energia que é dissipada deve-se ao atrito existente entre as estruturas do rolamento. À medida que se vai desgastando, a vibração do rolamento é cada vez mais intensa o que significa que a quantidade de energia dissipada sob a forma de calor aumenta e conseqüentemente a temperatura do rolamento também aumenta.

Geralmente, os sinais de vibração e temperatura dos rolamentos medidos pelos sensores estão no domínio temporal. No entanto estes sinais também podem ser representados no domínio das frequências do sinal e no domínio composto (tempo-frequência). Deste modo, a análise de um sinal em CM pode ser distinguida em três classes distintas: análise do domínio do tempo, análise do domínio das frequências e análise do domínio tempo-frequência do sinal.

Para fazer análise de sinal no domínio temporal são utilizados parâmetros estatísticos como o valor eficaz (Root Mean Square (RMS)), o valor do pico, o fator de crista (*crest factor*) e a curtose (*kurtosis*) [16, 20–22]. Os *condition indicators* RMS, fator de crista e curtose determinados a partir do sinal são os mais relevantes neste tipo de análise porque os seus valores têm tendência a aumentar com a degradação dos rolamentos [22]. Assim, através da evolução verificada nestes CIs é possível determinar em que condição está o rolamento.

Através da análise do domínio das frequências é possível obter informações sobre o sinal que não são observadas no domínio temporal pois este tipo de análise identifica e isola componentes das frequências de interesse [23]. As ferramentas mais utilizadas para fazer a análise de sinal neste domínio são a transformada rápida de Fourier (FFT) que permite analisar todo o espectro do sinal ([20]) e a curtose espectral. No domínio das frequências, o valor da curtose é utilizado em diferentes bandas de frequências de forma a identificar as bandas onde há maior variação do sinal [16, 19]. Com esta técnica de análise de sinal é possível identificar no espectro do sinal as frequências naturais do rolamento e determinar o tipo de falhas que estão presentes. Devido a fadiga do material, geralmente, as falhas dos rolamentos estão associadas a defeitos numa das suas estruturas ("gaiola", esferas, anéis interno e externo).

Quando ocorrem falhas em rolamentos, geralmente, os sinais são transientes e não-estacionários [23]. Como a análise do domínio das frequências é incapaz de lidar com este

tipo de sinais, a alternativa é a análise de sinal no domínio composto tempo-frequência. Este tipo de análise utiliza distribuições de tempo e frequência e representa a energia ou potência do sinal em função destes dois domínios, obtendo-se um gráfico tridimensional. A transformada de Fourier de curta-duração (STFT) e a transformada de Onduleta (WT) são as técnicas mais utilizadas na análise de sinais no domínio composto para fazer CM e diagnóstico de falhas em rolamentos [18, 20, 21].

2.4 Algoritmos implementados em *condition monitoring*

Os algoritmos implementados em *condition monitoring* de rolamentos podem ser utilizados para detetar e diagnosticar falhas ou prever o instante de tempo em que um rolamento irá falhar.

Wang et al. ([24]) propuseram um algoritmo, composto por três fases, para estimar a fiabilidade e prever o tempo de vida útil restante dos rolamentos (*Remaining Useful Lifetime (RUL)*). Este método utiliza uma rede neuronal *feed-forward* para prever a evolução das tendências dos parâmetros extraídos dos sinais de vibração através da análise de correlação durante a fase 1. De forma a melhorar a precisão da previsão feita pela rede neuronal, são inseridos na rede como entradas externas os dados relativos à temperatura dos rolamentos. A última fase do algoritmo consiste na previsão do RUL do rolamento através do modelo *Weibull proportional hazard* [24].

Hoang e Kang ([20]) exploraram a aptidão que a Convolutional Neural Network (CNN) tem em classificar imagens e desenvolveram um algoritmo para fazer o diagnóstico de falhas em rolamentos de forma automática. Através dos sinais de vibração do rolamento (representados a uma dimensão) obtém-se uma imagem em tons de cinzento. Para isso, a amplitude de cada amostra no sinal de vibração é normalizada para o intervalo $[-1,1]$. De seguida, a amplitude normalizada de cada amostra torna-se a intensidade do pixel correspondente da imagem de vibração, sendo que o número total de pixels da imagem e o número de amostras no sinal de vibração são iguais. Após a transformação dos sinais numa imagem de vibração em tons de cinzento, esta é introduzida na rede neuronal. Através da classificação dos parâmetros recolhidos nas camadas intermédias, realizada pela função *Softmax* presente na última camada da CNN, é feito o diagnóstico do tipo de falha presente no rolamento [20].

Modelos de inteligência artificial como por exemplo Artificial Neural Networks (ANNs), Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) e Support Vector Machine (SVM) têm sido utilizados para diagnosticar a presença de falhas em rolamentos. Recentemente, Ertunç [22] sugeriu um algoritmo de tomada de decisão baseado na associação de ANN, ANFIS e SVM com o objetivo de melhorar o desempenho do diagnóstico de falhas em rolamentos. A ideia chave deste algoritmo consiste em beneficiar do bom desempenho que cada um dos métodos tem em detetar e diagnosticar falhas em rolamentos, e posteriormente combinar as decisões obtidas individualmente por cada método de forma a obter

maior precisão nos diagnósticos realizados [22].

Qin et al. ([25]) sugeriram uma nova abordagem para prever o RUL de máquinas rotativas com base num indicador de degradação ideal. Primeiro, através de um algoritmo genético determina-se um indicador de degradação ideal usando o conceito de primeiro tempo de previsão (FPT do inglês First Predicting Time). Posteriormente, um modelo de degradação de Wiener baseado no indicador de degradação ideal é implementado para determinar o FPT e estimar o RUL do rolamento [25].

Com a intenção de prever o RUL de um rolamento, Yoo e Baek ([23]) apresentaram o método CWTCNN-HI. Neste método é aplicada a transformada de onduleta contínua (CWT) para converter os sinais de vibração numa imagem que contenha a informação do domínio do tempo e do domínio das frequências do sinal. Posteriormente, esta imagem é introduzida numa arquitetura CNN de duas dimensões e a rede estima o indicador de "saúde" (Health Indicator (HI)) do rolamento. Finalmente, através do HI estimado, o algoritmo Gaussian Process Regression (GPR) faz uma previsão de HI e de tendências de degradação futuras. Ao considerarmos que a falha ocorre no instante em que os valores do HI previsto e de limiar são iguais, como foi referido na secção 2.2, a diferença entre este instante e o tempo atual representa o RUL previsto.

2.5 Eletrônica para ambientes hostis

A monitorização de rolamentos utilizados na indústria aeroespacial é um procedimento extremamente complexo pelos ambientes hostis a que estes estão sujeitos. As suas elevadas temperaturas e vibrações constituem um enorme desafio ao desenvolvimento de eletrônica para este tipo de ambientes. Neste tipo de aplicações os rolamentos têm de suportar, tipicamente, temperaturas de 150 °C. Porém estes valores rapidamente excedem os 200 °C aproximando-se dos 300 °C quando os rolamentos são elementos constituintes dos motores [26, 27]. Desta forma, os sensores utilizados devem ser capazes de garantir a aquisição de sinal em ambientes com altas temperaturas, o que implica a utilização de tecnologias com grande sensibilidade e resistência a estes valores de temperatura. É fundamental que os sensores sejam constituídos por materiais que suportem gamas de temperaturas superiores às verificadas em ambientes hostis pois dessa forma a probabilidade de estes falharem é reduzida. Uma solução passa por utilizar materiais semicondutores como sensores pois funcionam para gamas de temperaturas elevadas, até 300 °C para semicondutores Silício em isolador (Silicon on Insulator (SOI)) e GaAs (Gallium Arsenide) e até 600 °C para o semicondutor Silicon Carbide (SiC) como se observa na figura 2.4 [26].

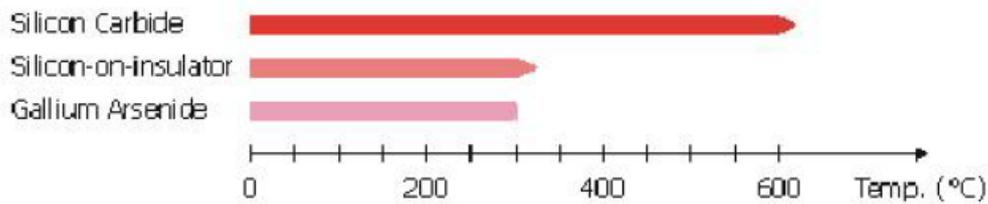


Figura 2.4: Gama de temperaturas de materiais semicondutores [26].

Além disso, as elevadas temperaturas verificadas neste tipo de ambientes implicam que os materiais utilizados para revestir a eletrónica sejam metálicos ou cerâmicos, por terem elevada resistência e temperatura de fusão em vez do plástico que se degrada rapidamente. Por outro lado, de forma a minimizar o elevado ruído elétrico característico de ambientes hostis, é fundamental que as ligações entre os sistemas de aquisição e processamento de sinal sejam muito curtas.

Além dos desafios principais que foram apresentados anteriormente, existem outras preocupações que devem ser consideradas para que o sistema seja aplicável a ambientes hostis. A miniaturização do sistema é simultaneamente um problema e uma necessidade fundamental neste tipo de ambientes. Por um lado, a redução da massa dos sistemas, geralmente, é uma alternativa eficaz para minimizar a sua aceleração. A aceleração do sistema tem implicações no ruído que é detetado. Deste modo, minimizar a aceleração possibilita reduzir o ruído o que significa melhor relação sinal-ruído e, conseqüentemente, um sistema mais robusto. Todos os dispositivos eletrónicos em funcionamento aquecem devido ao excesso de calor produzido. Por isso é fundamental que o calor excedente seja dissipado para que os valores de temperatura adequados ao bom funcionamento da eletrónica se mantenham, de forma a que falhas prematuras sejam evitadas e a fiabilidade das medições seja melhorada. Por outro lado, a miniaturização para ambientes hostis implica restrições adicionais para o controlo da temperatura adequada ao bom funcionamento da eletrónica já que as temperaturas verificadas neste tipo de ambientes são muito altas.

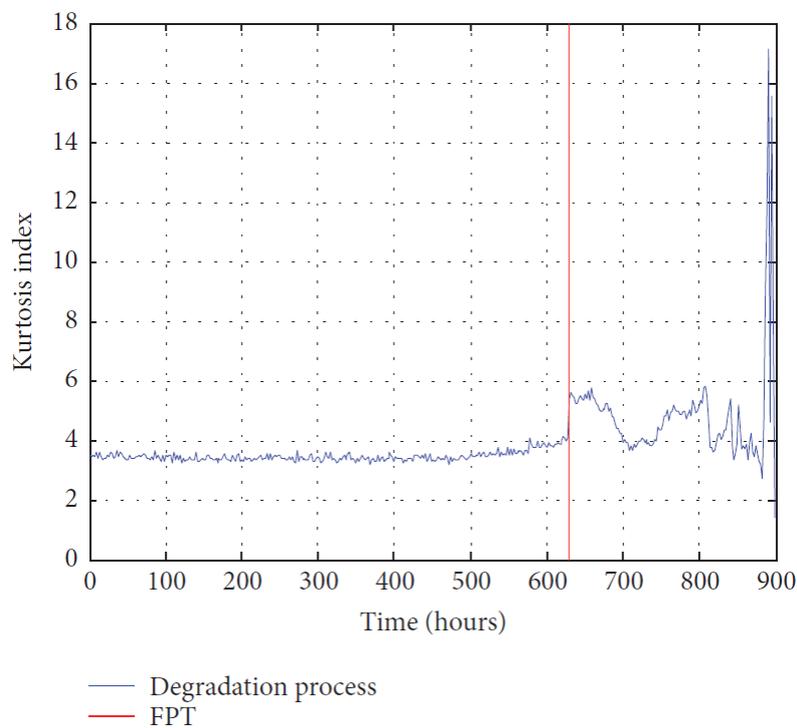
2.6 Serviços para *condition monitoring*

Como foi referido na secção 2.4, Qin et al. apresentaram uma nova abordagem para estimar o RUL de rolamentos. Para testarem a nova abordagem utilizaram oito rolamentos como está apresentado na tabela 2.1. Nesta tabela, podemos ainda observar os tempos de falha de cada rolamento, ou seja, os tempos em que os valores observados superaram o valor de limiar. Através destes tempos de falha determinaram que a vida total expectável, valor médio, destes rolamentos era 932 h.

Tabela 2.1: Tempos de falha dos rolamentos com defeitos no anel exterior [25].

Rolamento	1	2	3	4	5	6	7	8
Tempo de falha (h)	900	918	954	876	922	894	988	1002

Na figura 2.5 podemos observar a variação da curtose do sinal de vibração do rolamento em função do tempo de teste. Como constatamos, o gráfico da curtose está dividido em duas fases através do FPT. Para valores de tempo inferiores a FPT o valor da curtose praticamente não varia, aumentando rapidamente após este instante. Qin et al. determinaram que para estes rolamentos o tempo inicial de degradação era 630 h.

**Figura 2.5:** Gráfico da curtose do sinal de vibração do rolamento em função do tempo de teste [25].

Apenas os valores do indicador de degradação ideal referentes a tempos superiores a 630 h, FPT, serão introduzidos no modelo de Wiener para estimar o RUL. Desta forma, estes autores obtiveram um tempo de vida útil do rolamento de 289 h, ou seja, previram o aparecimento de falhas no rolamento com uma antecedência de 289 h, sendo, o valor máximo para a previsão de falhas referido na literatura reportada. Através da expressão $T_{vida\ total} = FPT + RUL$ podemos obter o tempo de vida total do rolamento. Nesta situação, os autores estimaram um valor de 919 h para a vida útil total do rolamento, valor bastante próximo do valor médio dos resultados experimentais, o que significa que o método implementado é muito exacto a estimar o RUL do rolamento.

Ao longo do tempo foram criados diversos produtos e serviços que hoje em dia ainda

estão no mercado para monitorizar a condição de rolamentos com o objetivo de prever e detetar o tipo de falhas que surgem nestes elementos.

O sistema reportado por Stack em 2008 ([28]) para detetar a presença de falhas em rolamentos contém um dispositivo que deteta o desenvolvimento de falhas pela comparação de sinais de vibração amostrados com padrões de ruído estandardizados e um aparelho para indicar a presença da falha no rolamento. O detetor para fazer a comparação primeiro tem de desenvolver padrões de ruído de referência através dos primeiros sinais de vibração medidos e amostrar os sinais de vibração que foram adquiridos posteriormente.

A invenção de Judd em 2009 ([29]) consiste num método (Bearing LifeGuard[®]) que indica a probabilidade de um rolamento falhar durante o período escolhido por um utilizador em que está a ser feita a previsão e o risco financeiro correspondente. Para isso, o método começa por determinar o fator de degradação de um rolamento através do seu sinal de vibração. Após ser selecionado um tempo médio para falhas (MTTF) em rolamentos e o período em que é feita a previsão, este método determina o tempo médio reduzido para falhas (RMTTF). O tempo médio reduzido é calculado através do MTTF escolhido e do fator de degradação do rolamento. Posteriormente, recorrendo-se ao fator de degradação calculamos a probabilidade de o rolamento falhar durante o período de previsão pretendido. Por último, o Bearing LifeGuard[®] determina o risco financeiro para o período de previsão a partir da probabilidade de o rolamento falhar no período selecionado e do custo de manutenção da falha.

Em 2017, o método desenvolvido por Bao ([30]) para fazer o diagnóstico de falhas de rolamentos inicia-se com a aquisição de sinais da vibração do rolamento e a sua decomposição através do algoritmo Empirical Mode Decomposition (EMD). Posteriormente, para obter um espectro do sinal é feita a extração de picos, deteção de envelope e conversão do domínio do tempo para frequências do sinal de decomposição com recurso à técnica *PeakVue*. A última fase deste método consiste na comparação do espectro do sinal com a frequência de falha do rolamento de forma a diagnosticar o tipo de falha que está presente.

Para detetar falhas precoces de rolamentos, como é divulgado em [31], Wenyang e Wenxuan desenvolveram em 2018 um método que se baseia num acoplamento de fase e num algoritmo que determina a amplitude bi-espectral de um sinal, ou seja, determina a amplitude a partir de dois espectros de frequências. Este método começa por fazer a medição da vibração de um rolamento, através de acelerómetros, seguida de uma reamostragem dos sinais adquiridos. Aos sinais reamostrados é aplicada a transformada de Fourier para obter a distribuição da amplitude do sinal no domínio das frequências que é depois utilizada para estimar a gama da frequência de ressonância do sistema. Com base neste valor e na frequência de falha característica do rolamento (frequência de falha do anel interior, esferas, ou anel exterior) é representada a amplitude do sinal numa distribuição tri-dimensional em função dos dois espectros de frequências. Por fim, o método determina o tipo de falha presente no rolamento através da presença de picos na frequência de falha

característica do rolamento. Assim, se se verificarem por exemplo picos para o valor da frequência de falha do anel interior significa que a falha encontra-se no anel interior do rolamento.

Em 2018 Bu e Guo desenvolveram um método para monitorizar a restante vida útil do rolamento, como é apresentado na sua patente ([32]). Para determinar o tempo de vida útil (RUL) do rolamento, o método começa por determinar a posição e o tamanho da falha do rolamento enquanto este está em operação. De seguida, é determinado o modo de falha do rolamento e a taxa de evolução da falha. Além disso, também é calculado o valor de falha, ou seja, valor máximo que o defeito pode alcançar quando o rolamento falha. Através do tamanho da falha, da sua taxa de expansão e do valor de falha, o método determina o RUL do rolamento, ou seja, indica o tempo de vida do rolamento antes deste falhar.

Capítulo 3

Montagem experimental

3.1 Sensores

Como foi referido na secção 2.3 a principal técnica de monitorização da condição de rolamentos é a análise de vibração. Porém também é muito frequente recorrer-se ao fenómeno de emissão acústica para monitorizar o estado destas componentes. A emissão acústica é o fenómeno da radiação de ondas acústicas (também designadas por ondas elásticas) em sólidos que se verifica quando um material sofre transformações irreversíveis na sua estrutura interna como por exemplo a formação de fissuras [3, 33]. A figura 3.1 representa o princípio de funcionamento de um sistema que monitoriza emissão acústica. Quando uma falha está em fase de desenvolvimento produz transientes de energia na forma de ondas sonoras de alta frequência que se propagam no interior do material (fonte) e que posteriormente são recebidas por sensores. Devido ao aparecimento das fissuras verifica-se um aumento da fricção no rolamento e deste modo ocorre uma variação na temperatura do mesmo. Assim sendo, estes três tipos de sensores, temperatura, acelerómetros e emissão acústica, assumem um papel muito importante na avaliação do desempenho dos rolamentos. Nesta secção serão apresentadas as características principais dos sensores utilizados na aquisição de dados do projeto iBearing.

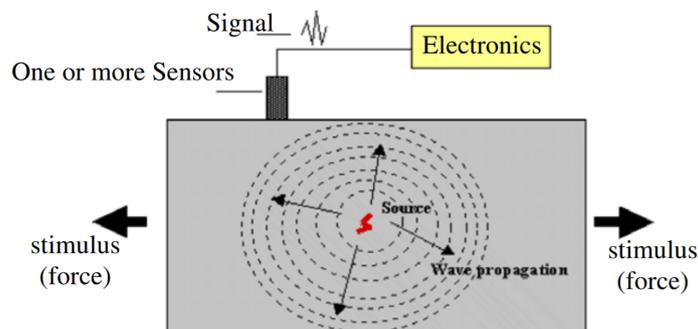


Figura 3.1: Princípio de funcionamento da emissão acústica [33].

3.1.1 *Resistance Temperature Detectors (RTDs)*

Termorresistências (RTDs) são dispositivos adequados a medições de temperatura muito precisas. Estes sensores utilizam uma resistência eléctrica e requerem uma fonte de energia para medir os valores de temperatura ao invés dos termopares em que o modo de funcionamento consiste no efeito de Seebeck. No efeito de Seebeck há produção de uma diferença de potencial entre duas junções de condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando existe uma diferença de temperaturas entre elas.

Durante o projeto iBearing a monitorização da temperatura com recursos aos RTDs teve dois motivos fundamentais. Por um lado, para fins de calibração quer dos sensores quer dos respetivos módulos de condicionamento de sinal já que os seus desempenhos estão dependentes da temperatura ambiente do sistema. Por outro lado, a medição da temperatura possibilita a monitorização da condição de rolamentos uma vez que se verifica uma variação na temperatura das componentes consoante o rolamento apresenta uma degradação mais acentuada. Além da temperatura variar com o tempo de operação e a degradação do rolamento, geralmente, também se observam gradientes térmicos que estão associados à presença de defeitos numa ou mais componentes do rolamento. Deste modo, com o objetivo de medir estes gradientes térmicos é muito frequente a utilização de pares de RTDs como se verifica neste projeto.

No processo de seleção destes sensores para qualquer tipo de projeto é sempre necessário ter em conta os parâmetros mais importantes do sensor, como por exemplo a gama de temperaturas de operação, sensibilidade, dimensões ou configuração funcional. Algumas destas características das termorresistências encontram-se na tabela 3.1. Porém, como os RTDs disponíveis no mercado abrangem uma larga gama de temperaturas, isto é, podem ser aplicados desde ambientes criogénicos (temperaturas muito baixas) a ambientes hostis (altas temperaturas e vibrações), a região de temperaturas de funcionamento destes sensores não constitui grande problema no processo de seleção. Os requisitos mais críticos e importantes são a precisão do sensor relativamente às medições e a sua configuração funcional. Para o projeto iBearing a Active Space Technologies determinou que a escolha dos RTDs deveria recair sobre as Pt100 pois a variação da resistência era de apenas 0,385 Ω por $^{\circ}\text{C}$. Além disso, a Pt100 deveria ter uma configuração de 4 fios já que deste modo o sensor tem melhor sensibilidade e maior precisão na medida.

Tabela 3.1: Principais características dos RTDs adequados ao projeto iBearing.

Sensor	T [$^{\circ}\text{C}$]	Vibração [G]	Configuração
RTD4	[-50; 250]	20	Pt100; conexão de 2, 3 ou 4 fios

Um esquema da configuração de 4 fios de uma termorresistência (RTD) é apresentado na figura 3.2. Neste tipo de configurações, o conjunto de fios exterior fornece a corrente (I) ao circuito que é utilizada na medição enquanto os fios interiores são utilizados para medir

a queda de potencial (V) aos terminais do sensor. Desta forma, a medição da resistência através da lei de Ohm, $R = \frac{V}{I}$ é muito mais precisa já que o efeito das resistências das ligações é compensado, o que significa que existe maior exatidão no valor de temperatura que é determinado.

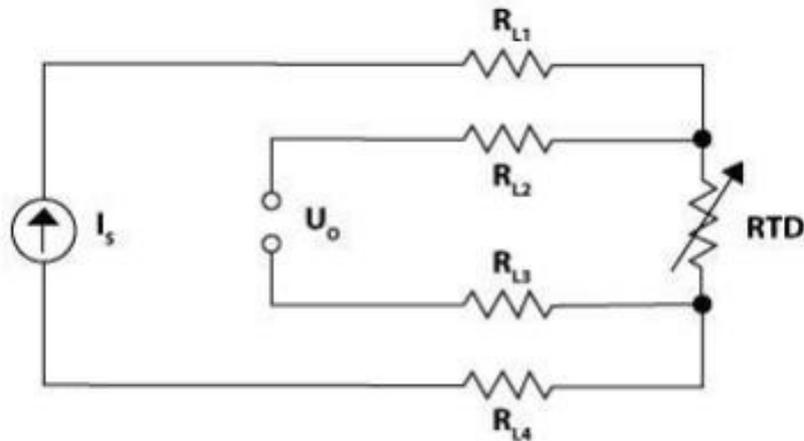


Figura 3.2: Esquema de um RTD com uma configuração de 4 fios [34].

3.1.2 Acelerómetros

Como foi exposto no início do capítulo, a principal técnica de monitorização da funcionalidade de um rolamento é a análise de vibração. Para medir os níveis de vibração característicos de rolamentos um dos sensores mais utilizados e melhor sucedido é o acelerómetro. Para além dos requisitos globais do projeto, temperatura de operação e nível de vibração, é necessário considerar requisitos específicos relativos a estes sensores quando pretendemos fazer uma seleção. Estes requisitos consistem por exemplo na largura de banda, tecnologia com capacidade de deteção, sensibilidade, massa, tamanho e número de eixos em que é feita a deteção. Os requisitos específicos mais importantes são a sensibilidade, a gama de frequências e a temperatura máxima a que são operacionais. Como existem sensores triaxiais e uniaxiais, o número de eixos para os quais os sensores escolhidos fazem medições é uma característica relevante já que as dimensões e a massa de sensores uniaxiais diferem significativamente relativamente à dos triaxiais. De forma a ser possível detetar pequenos defeitos presentes nos rolamentos numa fase primária, é fundamental que o intervalo de frequências para o qual os sensores são sensíveis seja o mais amplo possível.

Numa primeira seleção deste tipo de sensores foi escolhida uma dúzia de acelerómetros sendo que na fase de seleção seguinte esta lista reduziu-se para metade, com os sensores designados de (AC1-AC6). Por fim, decidiu-se que o projeto iBearing incluiria dois acelerómetros, AC2 e AC3, com as características que estão sumarizadas na tabela 3.2. No processo de seleção destes dois sensores consideraram-se as seguintes condições:

- Inclusão de pelo menos dois acelerômetros para possibilitar a correlação de dados.
- Pelo menos um dos sensores deve ser triaxial de forma a determinar as direções preferenciais.
- Pelo menos um dos acelerômetros deve ser adequado a ambientes hostis e a temperatura de operação deve ser tão elevada quanto possível.
- Pelo menos um acelerômetro deve ter pequenas dimensões, geralmente associadas a acelerômetros uniaxiais.
- A largura de banda de cada sensor deve ser de pelo menos 20 kHz.
- A sensibilidade deve ser tão alta como possível, preferencialmente melhor que 1 mV/G.
- A massa e o tamanho dos sensores devem ser o menor possível.

Tabela 3.2: Principais características dos acelerômetros escolhidos.

Sensor	Frequência [kHz]	Sensibilidade	Massa [g]	Temperatura [°C]	Eixos
AC2	0,0015-40	10 mV/G	3,6	125	3
AC3	0,001-26	1,5 pC/G	0,75	250	1

3.1.3 Sensores de Emissão Acústica

Genericamente, estes sensores têm uma gama de frequências significativamente maior que a dos acelerômetros. Enquanto o limite superior dos acelerômetros é aproximadamente 40 kHz [9], nos sensores de emissão acústica a frequência mínima para o qual são sensíveis na maioria das vezes é superior a 100 kHz [18, 19]. Deste modo, os intervalos de frequências destes sensores não se sobrepõem salvo quando os sensores de emissão acústica têm a capacidade de fazer medições para frequências mais baixas. Devido à sua ampla largura de banda que inclui altas frequências, este tipo de sensores é muito útil para detectar falhas em rolamentos quando estas ainda estão numa fase inicial. Contudo, não é tão fácil encontrar estes sensores como sucede com os acelerômetros já que existem poucos fabricantes e fornecedores. Portanto, é ainda mais crítico analisar cuidadosamente as características intrínsecas dos sensores de emissão acústica quando queremos integrá-los num projeto específico como o iBearing. As principais características são a banda de frequência, sensibilidade, massa, tamanho e temperatura máxima de operação.

A identificação pelo consórcio de um outro tipo de sensor que é capaz de medir a emissão acústica para baixas frequências possibilitou a correlação cruzada com os acelerômetros uma vez que existe sobreposição entre as suas gamas de frequências. Além disso, este sensor apresenta outras vantagens, tais como maior sensibilidade, menores dimensões e largura de banda mais ampla. Através de uma análise cuidadosa, a escolha recaiu sobre dois sensores de emissão acústica, AE4 e AE8, de um grupo de 10 pré-selecionados. De forma a selecionar os sensores com as características apresentadas na tabela 3.3, consideraram-se as seguintes condições:

- Inclusão de pelo menos dois sensores de emissão acústica com larguras de banda sobrepostas.
- Pelo menos um dos sensores deve ser adequado para ambientes adversos e a temperatura de operação deve ser tão elevada quanto possível.
- Pelo menos um dos sensores deve ser de pequena dimensão.
- A largura de banda deve abranger a região entre os 100 kHz e 1 MHz.
- A largura de banda deve sobrepor-se à dos acelerómetros.
- A sensibilidade deve ser tão elevada quanto possível, pelo menos 50 dB.
- A massa e o tamanho do sensor devem ser o mais baixo possível.

Na tabela 3.3 verificamos que a temperatura máxima a que o sensor AE8 opera é apenas 125 °C, valor inferior aos requisitos de temperatura impostos pela Thales e que não corresponde aos valores de temperatura característicos dos ambientes hostis. Contudo, este problema foi facilmente solucionado através do encapsulamento do sensor com um material resistente a valores de temperaturas elevados. Além disso, o fornecedor assegurou que uma nova versão do sensor utilizado no projeto seria adequada a condições ambientais adversas e estaria disponível a partir de Junho de 2017, o que significa que na fase de testes para degradação dos rolamentos este sensor poderia ser utilizado.

Tabela 3.3: Principais características dos sensores de emissão acústica.

Sensor	Frequência [kHz]	Sensibilidade [dB]	Massa [g]	Temperatura [°C]	Dimensões [mm]
AE4	200-950	-64	5	177	10 × 12
AE8	0,01-500	variável ²	5	125/(180)	20 × 4

3.2 Integração

Após ter sido feita a seleção dos sensores e escolhido o número de sensores a considerar, foi necessário integrá-los de modo a avaliar quer o seu desempenho quer a evolução da degradação num rolamento. Tendo em conta o número de sensores que era necessário integrar, fazê-lo diretamente no rolamento era inexequível quer pela restrição de espaço quer pelo formato complexo e diverso dos sensores. Sendo fundamental agrupar os sensores com o rolamento, a Schaeffler ficou responsável pelo design e fabrico da *sleeve*, caixa mecânica metálica onde seriam instalados os rolamentos, sensores e respetivos cabos e conectores. Na figura 3.3 podemos observar uma imagem da *sleeve* integrada com o rolamento e os sensores.

²A sensibilidade do sensor de emissão acústica AE8 varia com a frequência.

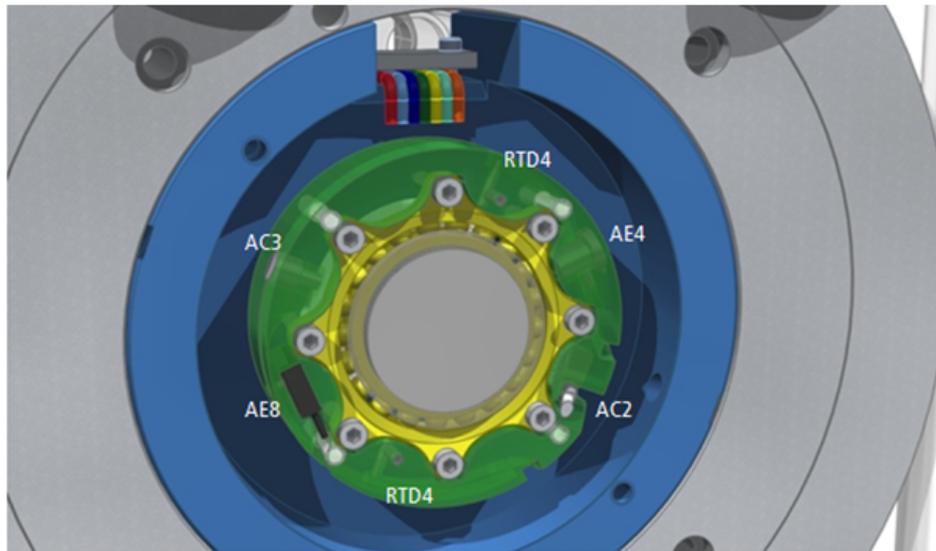


Figura 3.3: *Sleeve* integrada com o rolamento, sensores, cabos e conectores. Crédito: consórcio iBearing [35].

3.3 *Mock-up*

Como foi referido anteriormente, o objetivo do projeto iBearing consiste na produção de um protótipo que tenha a capacidade de fazer previsão de falhas de rolamentos quando sujeitos a condições ambientais adversas. Como é óbvio, para que o protótipo consiga prever a degradação da condição dos rolamentos neste tipo de ambientes é fundamental que este seja resistente e que a sua implementação tenha em consideração as características principais dos ambientes hostis. No desenvolvimento do projeto iBearing, para fazer a previsão de falhas foi implementado um protótipo. A *mock-up* é um sistema mecânico e eletrónico composto por uma "caixa" onde são colocados os sensores e o rolamento (parte mecânica) e por um bloco que engloba as unidades de amplificação de sinal, um módulo de aquisição de dados, um computador e um *software* adequado à aquisição de dados e controlo do sistema (componente eletrónica). Com a implementação deste sistema, o consórcio pretendia obter respostas para as seguintes questões:

- Que tipos de sensores são necessários para validar a deteção de falhas?
- Quantos sensores têm de ser selecionados e onde devem estar posicionados?
- Qual é o parâmetro de cada sensor mais adequado, como por exemplo sensibilidade, ganho e largura de banda?
- Que tipo de *condition indicators* podem ser utilizados para alcançar a especificação de previsão de falha pretendida?
- Que tipos de desenvolvimentos de algoritmos são necessários para garantir os objetivos de 3σ e 100 h de previsão de falha?
- Como podem ser utilizadas as medidas de diferentes sensores para caracterizar os

modos de falha do rolamento?

- Quais são as principais limitações que a *mock-up* introduz no equipamento de teste, nomeadamente, nos rolamentos e no nível de vibração de fundo?
- Como é que o consórcio deve abordar problemas gerais associados à reprodutibilidade dos testes, como por exemplo medição da significância da previsão e conversão do tempo do teste realizado num equipamento de teste sujeito a condições limites para condições nominais de operação?
- O sistema é capaz de distinguir os modos de falha e de determinar a sua localização no rolamento?

Após o processo de seleção dos sensores e dos respetivos módulos de condicionamento e processamento de sinal que constituem a *mock-up* estar concluído, é importante apresentar um esquema que explique o modo de funcionamento deste sistema e como será desenvolvido. Desta forma, a figura 3.4 ilustra as principais unidades que são incluídas no sistema desenvolvido pelo consórcio assim como a contribuição de cada um dos parceiros. Como é perceptível da observação desta figura, a Active Space Technologies foi responsável pelo condicionamento e processamento de sinal. A planificação e fabrico da *sleeve* e rolamentos e a realização dos testes ficou a cargo da Schaeffler. Relativamente à análise de dados e definição de um algoritmo que validasse a previsão de falhas em rolamentos segundo os requisitos fundamentais do projeto, foi delegada à Universidade de Cranfield a execução destas tarefas.

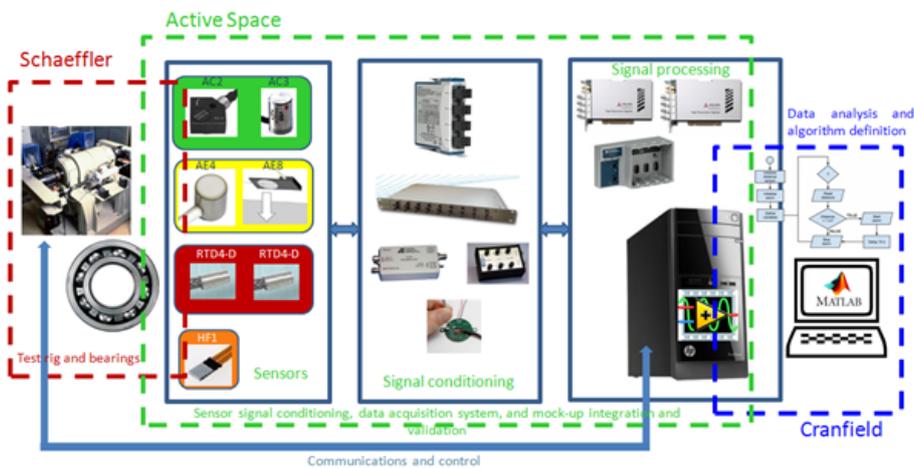


Figura 3.4: Esquema com as principais unidades da *mock-up*. Crédito: consórcio iBearing [35].

Na figura 3.5 é apresentado o diagrama de blocos que elucida como foi feita a implementação do sistema de aquisição e processamento de sinal na *mock-up* desenvolvida pelo consórcio. Da observação da figura constata-se que a amplificação dos sinais medidos pelos acelerómetros e sensores de emissão acústica é feita de forma individual já que a gama de frequências e o ganho são diferentes de sensor para sensor. A tabela 3.4 contém os valores

das taxas de amostragem, máximas e as estabelecidas durante a realização do projeto, para cada um dos grupos de sensores considerados. No caso do acelerómetro triaxial, AC2, a taxa de amostragem foi 200 kS/s para cada um dos eixos em que é feita a aquisição de sinal, ou seja, para cada um dos canais do sensor. Após a aquisição, os sinais são temporariamente armazenados na *mock-up* e é necessário processar o sinal, utilizando software comercial como por exemplo MATLAB e LabVIEW. Por fim, transferiram-se e guardaram-se num disco rígido todos os dados adquiridos para que posteriormente fosse realizada uma análise mais detalhada de forma a detetar padrões característicos da existência de falhas em rolamentos.

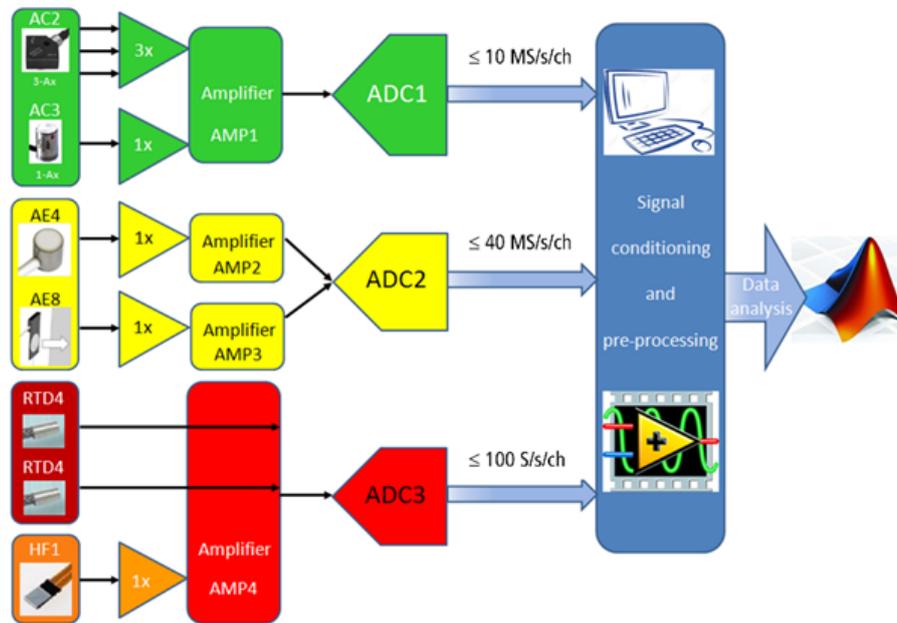


Figura 3.5: Diagrama de blocos do sistema de aquisição e processamento de sinal. Crédito: consórcio iBearing [35].

Tabela 3.4: Taxas de amostragem de cada conjunto de sensores.

	RTDs	Acelerómetros	Emissão Acústica
Taxa máxima	100 S/s	10 MS/s	40 MS/s
Taxa estabelecida	100 S/s	200 kS/s	2 MS/s

Nas figuras 3.6 e 3.7 são apresentadas a versão final da *mock-up*, com destaque das principais unidades que a constituem, e as interfaces gráficas usadas. Desenvolveram-se duas interfaces, uma para o utilizador (imagem da esquerda) e outra para o administrador do projeto (imagem da direita). Na interface do utilizador é possível selecionar parâmetros como o tipo de sensores enquanto a do administrador serve para controlar o sistema como por exemplo forçar a paragem do teste ou ajustar parâmetros como o ganho ou a taxa de amostragem dos sensores. A interface gráfica (Figura 3.7) foi desenvolvida em LabVIEW

e teve um papel essencial na resolução de problemas que surgiram durante a realização dos testes. Para além de comunicar com o sistema de aquisição de dados, esta interface tem a capacidade de controlar parâmetros de aquisição, processamento e armazenamento de dados e ainda possibilita a observação dos resultados do processamento realizado.



Figura 3.6: Ilustração da *mock-up* com referência às unidades mais relevantes do sistema. Crédito: consórcio iBearing [35].

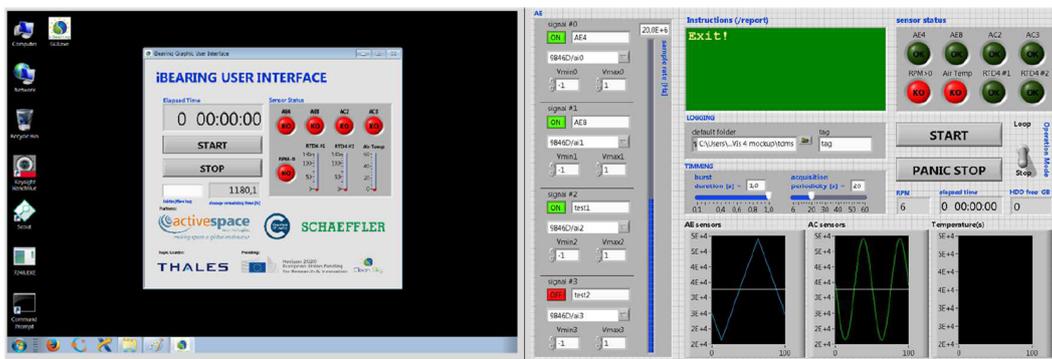


Figura 3.7: Interface gráfica da *mock-up* usada pelo utilizador (esquerda) e pelo administrador (direita). Crédito: consórcio iBearing [35].

3.4 Equipamento de teste

Para realizar os testes onde os rolamentos seriam sujeitos a velocidades e cargas superiores aos valores nominais, foi utilizado o equipamento de teste L38E. Este equipamento caracteriza-se por ter a capacidade de operar com a velocidade de rotação e as cargas (axial e radial) necessárias. Foram utilizados a *sleeve* e os rolamentos (C30XF1910GY10 de 21 esferas e C30XF1910GY12 de 19 esferas) fornecidos pela Schaeffler (Barden). Na figura 3.8 é apresentado o equipamento de teste utilizado no projeto iBearing. Uma vez que este equipamento, L38E, é um equipamento de teste que é acionado por uma correia

3.4. Equipamento de teste

de transmissão, significa que existe uma força tangencial que é aplicada por ação da correia. Para eliminar esta força tangencial foi integrada no equipamento de teste uma caixa de transmissão de forma a que no rolamento sejam apenas aplicadas cargas nas direções com maior interesse, radial e axial. Como qualquer motor, de forma a evitar uma fusão de peças metálicas que estejam em contacto e sujeitas a altas temperaturas e fricções, é importante fazer uma lubrificação contínua do sistema.

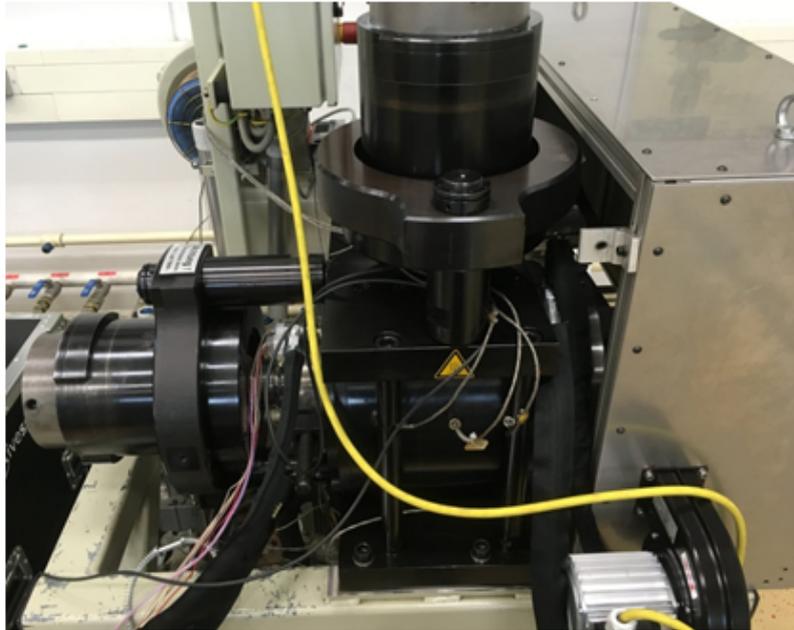


Figura 3.8: Equipamento de teste do iBearing. Crédito: consórcio iBearing [35].

Na Figura 3.9 são apresentadas as três unidades utilizadas durante os testes. Na imagem da esquerda situa-se a *sleeve* com os sensores, cabos e conectores; ao centro é mostrado uma imagem de um rolamento testado; à direita observa-se o sistema completo, ou seja, *sleeve* integrada com o rolamento e os sensores, aplicada no equipamento de teste.



Figura 3.9: *Sleeve* (esquerda), rolamento (centro) e motor do *test rig* integrado com a *sleeve*, rolamento, sensores e respetivos cabos e conectores (direita). Crédito: consórcio iBearing [35].

3.5 Testes

Nesta secção são apresentados os testes realizados com o equipamento de teste L38E referido na secção 3.4, assim como as suas principais características, isto é, velocidades de rotação e forças aplicadas no rolamento e a sua duração. No equipamento de teste foram realizados dezenas de testes. Porém apenas sete foram de longa duração com o objetivo de estudar a evolução da degradação da estrutura dos rolamentos. Estes testes de longa duração tiveram um período de execução contínuo e aquisição de dados entre um e três dias consecutivos. Os restantes testes com durações entre dezenas de segundos e poucos minutos foram realizados para o consórcio poder ajustar parâmetros como o ganho dos amplificadores ou a temperatura máxima de operação do sistema. Dos sete testes de ensaio destrutivo que foram realizados apenas são apresentados três uma vez que a interpretação dos outros quatro era mais complexa devido à variabilidade das condições de teste e de fiabilidade dos mesmos. Nos três testes apresentados foram utilizados os rolamentos designados por C30XF1910GY12 (ilustrado na figura 3.10), constituídos por 19 esferas que percorrem as pistas interior e exterior do rolamento. A tabela 3.5 evidencia as principais características deste rolamento. É importante referir que o equipamento de teste utilizado tem a capacidade de parar de forma automática sempre que condições de vibração pré-determinadas pela Schaeffler eram atingidas. Isto significa que quando o nível de vibração sentida pelo rolamento ultrapassa um valor limite a aquisição de dados é suspensa e considera-se que o rolamento está degradado.

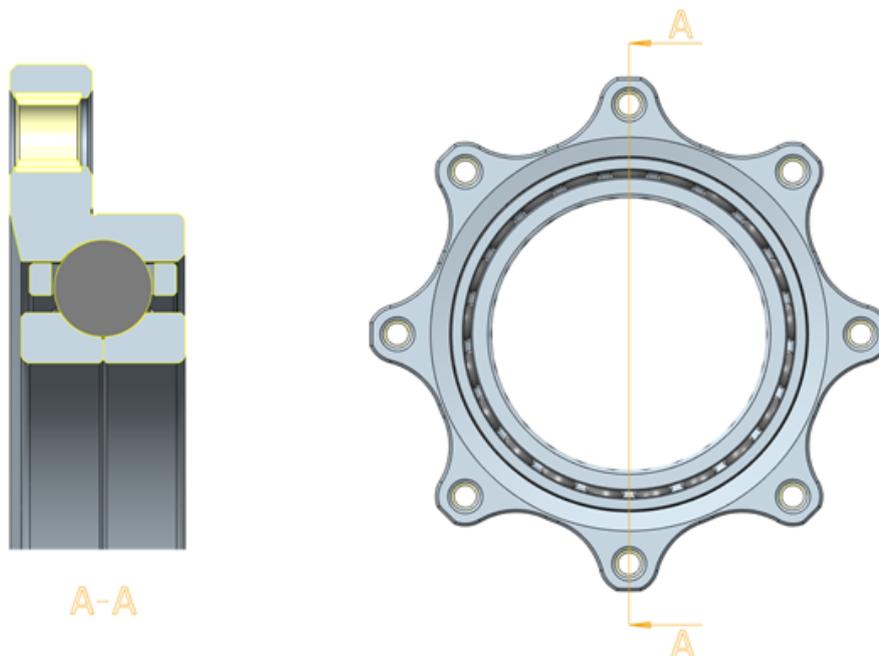


Figura 3.10: Esquema de um rolamento aplicado na indústria aeronáutica.

Tabela 3.5: Dimensões do rolamento de 19 esferas (C30XF1910GY12).

Parâmetros	Valor
Diâmetro do eixo	50 mm
Diâmetro exterior	72 mm
Largura	12,75 mm
Tolerâncias	Anéis: ABEC 7 Esferas: Classe 5
Materiais	Anéis: Cronidur [®] 30 Esferas: Cerâmicas (Si_3N_4) Gaiola: Aço AMS 6640
Diâmetro das esferas	9/32 polegas (7,144 mm)
Capacidades de carga	Dinâmica: 14,7 kN Axial: 17,5 kN Radial: 9,9 kN
Massa	195 g

3.5.1 Teste de 6000 RPM

O Teste de 6000 RPM também designado por *Commissioning test* foi o primeiro teste de ensaio destrutivo realizado pelo consórcio no equipamento de testes. Este teste, por ser o primeiro a ser realizado, foi executado com uma velocidade rotação muito inferior à dos restantes testes visto que o consórcio, para além de querer estudar a evolução da degradação do rolamento, pretendia avaliar o desempenho do equipamento de teste durante o ensaio de longa duração. Na tabela 3.6 são apresentados os principais parâmetros deste teste.

Tabela 3.6: Parametrização do Teste de 6000 RPM.

Teste	Velocidade de rotação [RPM]	Forças [kN]	Duração do teste [min]
Teste 0	6000	$F_a = 2$; $F_r = 8$	1174

3.5.2 Teste de 10000 RPM

Após ser realizado o Teste 0 o consórcio realizou pequenos testes para ajustar determinados parâmetros do sistema sendo que posteriormente à calibração executou o segundo ensaio destrutivo da estrutura dos rolamentos, (Teste 1). As alterações que foram feitas neste teste foram a velocidade com que o eixo rodava e as forças aplicadas nos rolamentos. Os valores relativos aos parâmetros deste teste encontram-se na tabela 3.7.

Tabela 3.7: Parametrização do Teste de 10000 RPM.

Teste	Velocidade de rotação [RPM]	Forças [kN]	Duração do teste [min]
Teste 1	10000	$F_a = 6,5$; $F_r = 5$	4207

3.5.3 Teste de 12000 RPM

O Teste de 12000 RPM foi o último teste de longa duração para degradação de rolamentos realizado no *test rig* e a metodologia utilizada foi ligeiramente diferente dos dois testes anteriormente apresentados. Neste teste o consórcio optou por ir aumentando a velocidade de rotação do equipamento de teste até ao valor final de forma a registar a vibração do rolamento em cada um dos patamares de velocidade. Durante a realização do teste apenas se variou a velocidade de rotação, mantendo-se constante a carga aplicada. Os critérios da realização deste teste estão sumarizados na tabela 3.8.

Tabela 3.8: Parametrização do Teste de 12000 RPM.

Teste	Velocidade de rotação [RPM]	Forças [kN]	Duração do teste [min]
Teste 6	12000	$F_a = 5,85$; $F_r = 4,5$	1669

Capítulo 4

Análise de dados

4.1 Análise preliminar

Durante o período do estágio de Verão o objetivo principal da análise de sinal consistiu na observação de padrões e tendências nos sinais dos diferentes sensores para o Teste 0 e justificá-los de acordo com uma relação de causa-efeito. Apenas foram analisados os dados deste teste por ser o único onde existiu um acompanhamento total por parte de todos os membros do consórcio, que se traduz numa interpretação segura da relação causa-efeito dos padrões observados e pela minha reduzida experiência à data nesta área de interesse. Antes de iniciar a análise de dados foi necessário estudar as diferentes abordagens que são frequentemente aplicadas em projetos idênticos ao iBearing de modo a delinear a metodologia mais adequada a este projeto. O processo de análise foi progressivo, ou seja, analisaram-se de forma individual e em fases distintas do estágio os dados dos três tipos de sensor utilizados: temperatura, acelerómetros e emissão acústica. Inicialmente foram analisados os dados relativos à temperatura do rolamento pois a taxa de amostragem do sinal era de apenas 100 pontos por segundo, característica que possibilitava um processo de análise muito rápido e com pouco consumo de memória RAM. Posteriormente, foram analisados os dados obtidos pelos dois acelerómetros e por fim os dados dos sensores de emissão acústica. Para isso, os *condition indicators* utilizados basearam-se maioritariamente em parâmetros estatísticos tais como: valor eficaz (RMS), desvio padrão, assimetria (*skewness*), curtose, amplitude pico a pico ou fator de crista (quociente entre a amplitude pico a pico e o valor eficaz do sinal). O *software* utilizado para este propósito foi o MATLAB[®]R2018b da MathWorks[®]. De seguida, são apresentados os CIs com melhor desempenho nesta fase e os resultados obtidos para cada um deles.

4.1.1 Séries

Para cada CI implementado construíram-se séries de valores onde cada valor da série é obtido a partir das amostras de sinal adquiridas durante um intervalo de tempo de 1 minuto, a uma frequência de amostragem de 100 S/s para os RTDs, 200 kS/s para os acelerómetros e 2 MS/s para os sensores de emissão acústica. Isto significa que a cada minuto de aquisição, utilizam-se 100 pontos para determinar o valor da série do CI no caso dos RTDs, 200 000 pontos para os acelerómetros enquanto para os sensores de emissão acústica o número de pontos considerados é 2×10^6 . Para cada CI e para cada sensor é construída uma série de valores com um tamanho correspondente à duração do teste, 1174 minutos para o Teste de 6000 RPM e 1669 minutos para o de 12000 RPM. Posteriormente, para cada sensor são representadas em função do tempo as séries de valores dos CIs implementados para a observação de padrões que permitam concluir qual o estado de condição das estruturas do rolamento, se é um modo normal de funcionamento ou um modo de degradação.

4.1.2 Valor eficaz (RMS)

O valor eficaz ou raiz quadrada do valor quadrático médio, vulgarmente definido pela sigla RMS, é o método mais utilizado no domínio do tempo para refletir a energia e a amplitude de um sinal e avaliar a condição geral de funcionamento dos componentes. Este CI é muito útil para investigar o desenvolvimento da falha uma vez que o seu valor aumenta progressivamente para uma degradação cada vez mais acentuada [36, 37]. O valor RMS pode ser determinado através da equação 4.1.

$$s_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i)^2} \quad (4.1)$$

onde s_{rms} é o valor eficaz do sinal s , s_i é o conjunto de dados em cada minuto de aquisição e N o número de pontos no conjunto de dados s .

Nas figuras 4.1 e 4.2 são apresentados os gráficos do valor RMS calculado a partir da função $rms()$ do Matlab em função do tempo de teste para os diferentes sensores utilizados. Da observação da figura 4.1 constatamos que os padrões observados diferem entre os gráficos dos sensores de temperatura (linha de cima) e o do gradiente de temperatura (centrado em baixo). Nos gráficos da temperatura é apenas possível observar uma oscilação não sendo visível nestes sinais nenhum aumento evidente que esteja relacionado com a degradação do rolamento. Porém, ao calcularmos o gradiente térmico, diferença entre os dois valores de temperatura existentes no rolamento, verifica-se que na fase final do teste existe um aumento inegável desta variável física. A variação de temperatura observada num rolamento está associada ao aumento das tensões aplicadas entre duas estruturas adjacentes quando uma delas contém pequenas fissuras. Na região onde se situa a falha

estas tensões são ainda mais intensas o que implica uma maior fricção entre as superfícies de contacto das duas componentes. Pelo aumento da fricção nesta zona do rolamento verifica-se também um acentuar do valor da temperatura contrariamente ao que se sucede numa região saudável do rolamento.

Relativamente à figura 4.2 verificamos que nos gráficos dos acelerómetros (linhas de cima e do meio) os padrões observados são mais perceptíveis e permitem inferir com maior certeza a presença de falhas nas componentes do rolamento. Contrariamente, nos sinais dos sensores de emissão acústica (gráficos da linha de baixo) torna-se mais difícil de perceber a presença de padrões nítidos. A incapacidade de observar padrões e tendências claras para os sinais dos dois sensores de emissão acústica quando é feita a análise de sinal com todos os pontos do mesmo deve-se à elevada taxa de amostragem destes sinais. Como a taxa de amostragem destes sensores é de 2 MS/s e os valores medidos dos sinais são relativamente baixos, qualquer variação existente no sinal adquirido a cada minuto é suavizada quando normalizamos o sinal ao número total de pontos. Apesar de não ser tão evidente como nos gráficos dos acelerómetros constata-se que existe um ligeiro aumento do valor eficaz do sinal nos instantes finais do teste, sendo mais nítido para o sensor de emissão acústica AE4 do que para o AE8. Para os sinais de vibração é visível a presença de um patamar com uma duração aproximada de 1000 minutos seguido de uma região onde o sinal caracteriza-se por ter uma tendência linear crescente com o tempo. Da visualização destes gráficos depreende-se que no sinal da componente y do acelerómetro triaxial AC2, que representa a direção tangencial da vibração, existe um ruído mais intenso quando comparado com os sinais medidos nas direções axial (componente x do AC2) e radial (componente z de AC2 e sensor AC3). Isto verifica-se porque na direção azimutal o sistema é sensível a pequenas oscilações da velocidade de rotação do eixo. Além disso, é nesta direção que está colocada a correia de transmissão do *test rig*, o que significa que existe vibração associada ao deslizamento desta correia e conseqüentemente um aumento no ruído.

4.1. Análise preliminar

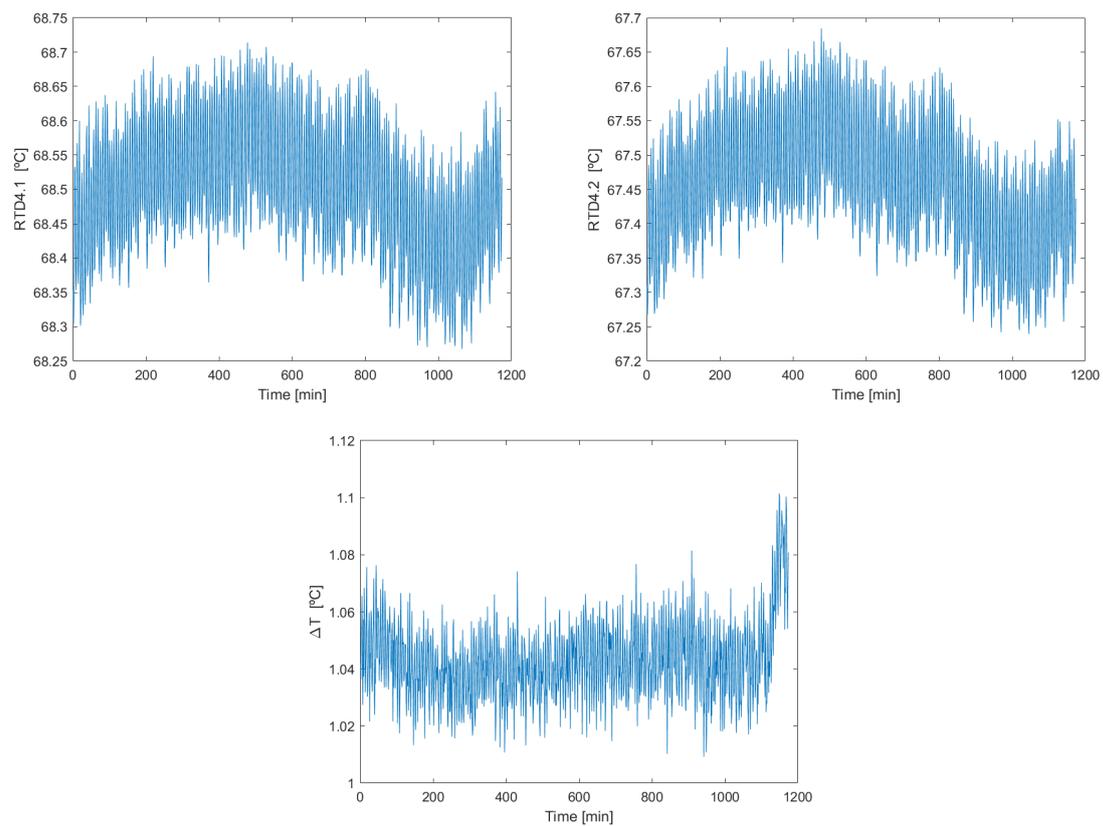


Figura 4.1: Gráficos do valor RMS do sinal em função do tempo de duração do Teste de 6000 RPM para os sensores de temperatura: RTD4.1 (esquerda), RTD4.2 (direita) e diferença de temperaturas (em baixo ao centro).

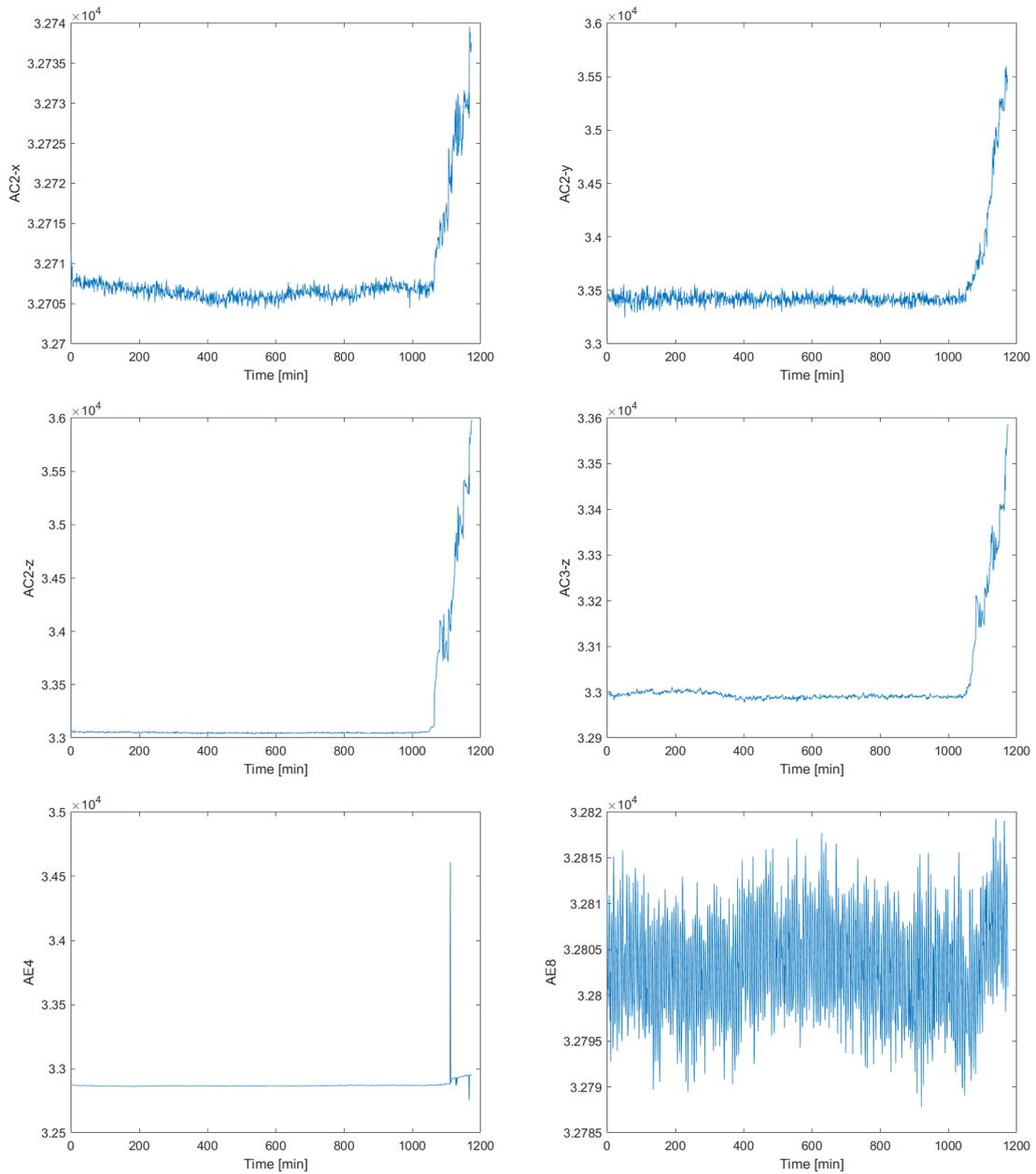


Figura 4.2: Gráficos do valor RMS em função do tempo para os acelerômetros e sensores de emissão acústica para o Teste de 6000 RPM. Da esquerda para a direita encontram-se, respetivamente, os sensores: AC2-x e AC2-y (em cima); AC2-z e AC3 (ao centro); AE4 e AE8 (em baixo).

4.1.3 Curtose

A curtose em teoria de probabilidades e estatística é a medida da forma que caracteriza o achatamento da distribuição de probabilidade de uma variável aleatória de valor real, ou seja, é um parâmetro que descreve a forma do histograma de ocorrências de valores de um sinal [38]. Para sinais com uma distribuição semelhante à Gaussiana, o valor da curtose é próximo de 3 sendo maior do que este valor em sinais que apresentem picos de grande intensidade e bem definidos, isto é, picos estreitos. A situação oposta, valores de curtose inferiores a 3, é característica em sinais bem uniformes onde não existem extremos bem definidos. Assim, pelo excesso de curtose (valor da curtose menos 3) classificam-se as distribuições em três tipos: mesocúrticas (excesso de curtose nulo); leptocúrticas (excesso de curtose positivo) e platicúrticas (distribuições com excesso de curtose negativo) [39]. Como um rolamento ao degradar-se tem um nível de vibração cada vez mais intenso, assume-se que sinais cuja distribuição possui picos bem definidos estejam associados à condição de degradação estrutural do rolamento. Desta forma, considera-se que o valor da curtose em rolamentos saudáveis é inferior ao valor verificado para os que apresentem fadiga. Assim, com base nesta afirmação é possível uma melhor interpretação de sinais deste parâmetro estatístico. Por definição, a curtose é o quarto momento normalizado, isto é, é o momento central de ordem quatro do sinal (relativamente ao valor médio) normalizado pelo quadrado do segundo momento central. Na equação 4.2 é apresentada a expressão que permite determinar o valor da curtose de um sinal amostrado [36, 37, 40].

$$Curtose = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^4}{\left[\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2 \right]^2} \quad (4.2)$$

onde, tal como na equação do valor RMS do sinal (4.1), s_i representa o conjunto de dados no instante i da aquisição e N o número total de pontos que constituem o sinal s_i . \bar{s} representa o valor médio do conjunto de dados s_i .

Assim como sucedeu para o valor eficaz, os valores da curtose foram determinados através da utilização de uma função das bibliotecas do *software* utilizado, a função *kurtosis()*. Os resultados obtidos podem ser vistos nas figuras 4.3 e 4.4. Para os gráficos da figura 4.3 não é possível retirar informações sobre a condição do rolamento, inclusive para o sinal da diferença de temperaturas. Isto significa que os valores dos sinais não atingem grandes picos e que estão próximos do seu valor médio. Porém, contrariamente aos RTDs, da visualização dos gráficos dos acelerómetros e sensores de emissão acústica na figura 4.4 é possível caracterizar o estado de operação do rolamento. Nestes gráficos apresentam-se duas fases que são claramente distintas. Numa primeira fase, os sinais medidos por estes dois tipos de sensor têm uma tendência constante ao longo do tempo de teste. Durante esta fase, as pequenas oscilações verificadas estão relacionadas com o ruído do sinal. Após

um determinado instante que varia para cada um dos sensores os sinais medidos apresentam uma região onde existe variação significativa que indicia uma alteração da condição de funcionamento do rolamento. Contudo, nesta fase o comportamento do sinal difere dos acelerómetros para os sensores de emissão acústica. Para os acelerómetros verificamos que o valor da curtose aumenta até atingir um valor máximo e que posteriormente apresenta uma tendência decrescente evidente. Já para os sensores de emissão acústica não é nítida a presença deste tipo de padrão, sendo apenas notório o aumento do valor da curtose após a fase constante. Considera-se que a diminuição do valor da curtose nos sinais de vibração está associada à expelição dos fragmentos de rolamento anteriormente removidos. Através do valor médio do patamar e da fase ascendente dos sinais é possível definir diferentes fases de degradação do rolamento de forma a compreender melhor o modo como esta evolui com o tempo.

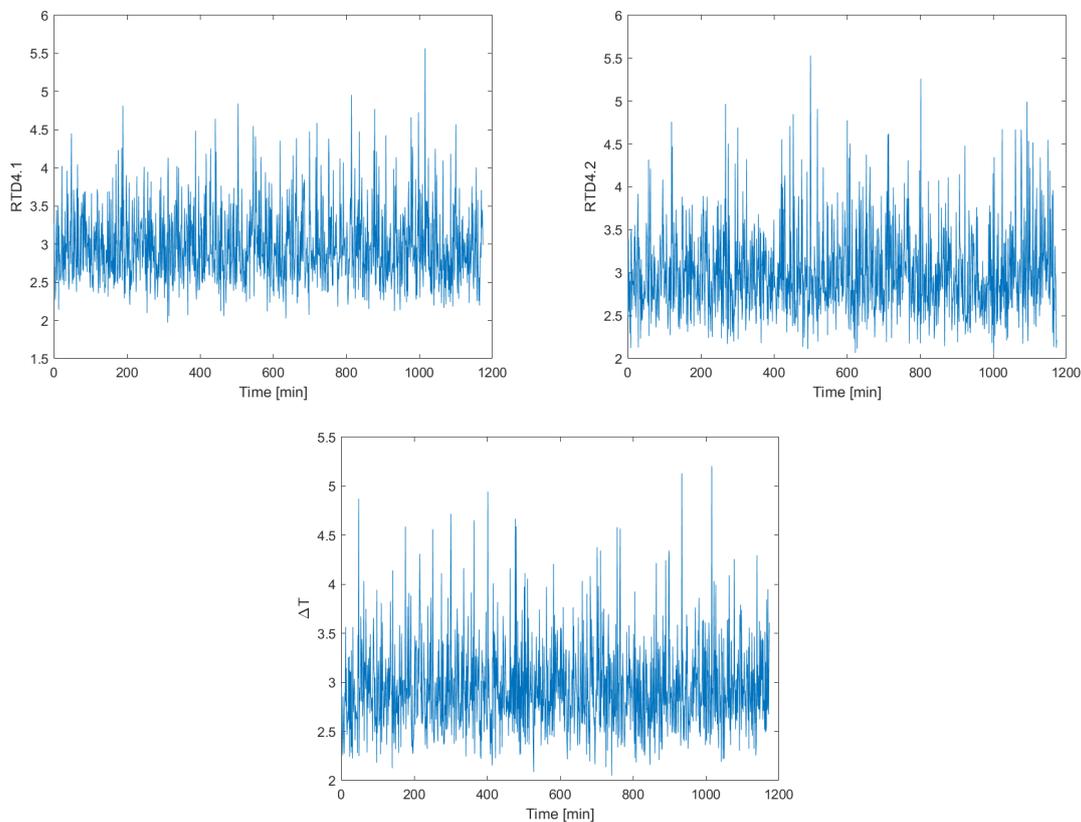


Figura 4.3: Gráfico do valor da curtose em função do tempo de duração do Teste de 6000 RPM para os sinais de temperatura: RTD4.1 (esquerda), RTD4.2 (direita) e diferença de temperaturas (em baixo ao centro).

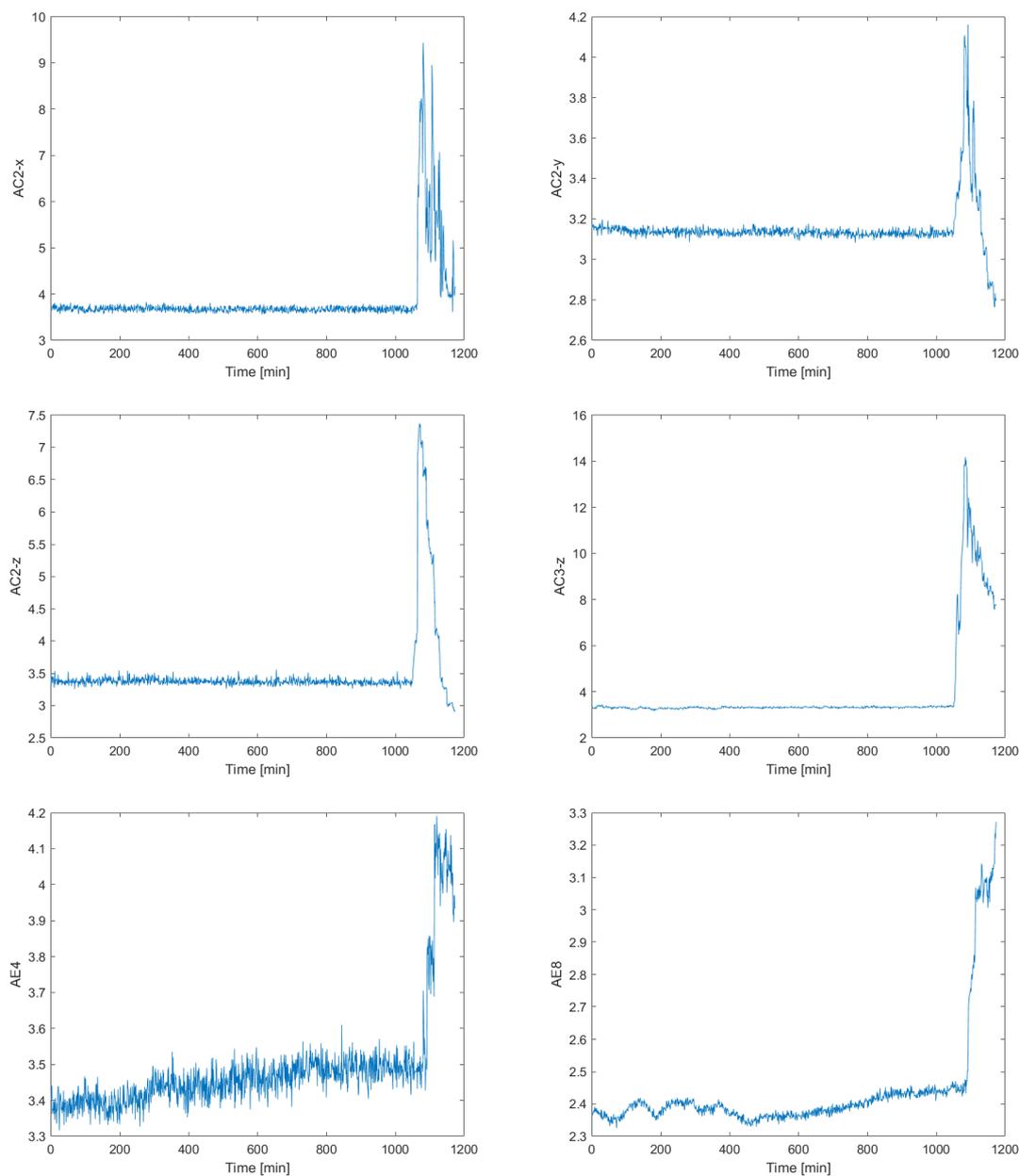


Figura 4.4: Gráficos do valor da curtose do sinal em função do tempo para os acelerômetros e sensores de emissão acústica para o Teste de 6000 RPM. Da esquerda para a direita encontram-se, respectivamente, os sensores: AC2-x e AC2-y (em cima); AC2-z e AC3 (ao centro); AE4 e AE8 (em baixo).

4.2 Análise avançada

Após observarmos padrões e tendências nos sinais adquiridos pelos sensores de temperatura, emissão acústica e acelerômetros para o Teste 0 que indicavam a presença de falha no rolamento utilizado, aplicou-se a mesma metodologia de análise aos outros dois testes anteriormente apresentados. Porém, devido à incapacidade de observar qualquer tipo de tendência ou padrão para os resultados do Teste 1 por a condição de paragem

do mesmo não ter sido automática como nos restantes testes, na subsecção 4.2.1 apenas são apresentados os resultados relativos ao Teste 6. De referir que nesta fase da análise não nos restringimos apenas ao domínio temporal dos sinais. Uma análise no domínio das frequências foi também realizada quer para o Teste 0 quer para o Teste 6. Na subsecção 4.2.2 (Domínio das frequências) são apresentadas as diferentes metodologias utilizadas neste domínio de análise e os resultados obtidos para os dois testes analisados.

4.2.1 Domínio do tempo

Nesta fase do projeto começamos por aplicar ao Teste 6 a metodologia que tinha sido anteriormente utilizada no Teste 0, descrita e apresentada na secção 4.1. De todos os CIs aplicados o valor eficaz (RMS) foi o que obteve melhores resultados do ponto de vista de visualização de padrões e tendências. Os gráficos obtidos são apresentados nas figuras 4.5 e 4.6. Da observação da figura 4.5 comprova-se a existência de diferentes níveis bem definidos do valor RMS da diferença de temperaturas. A presença destes patamares está associada às diferentes velocidades de rotação a que o rolamento foi sujeito durante a realização do teste, como foi referido na subsecção 4.2.1. No entanto, relativamente ao último nível, correspondente à velocidade de rotação 12000 RPM, não é visível na fase final uma tendência que comprove a fadiga do rolamento e o modo como esta evolui. Contudo, este gráfico possibilita uma melhor compreensão da variação do gradiente térmico no rolamento com a velocidade de rotação do sistema.

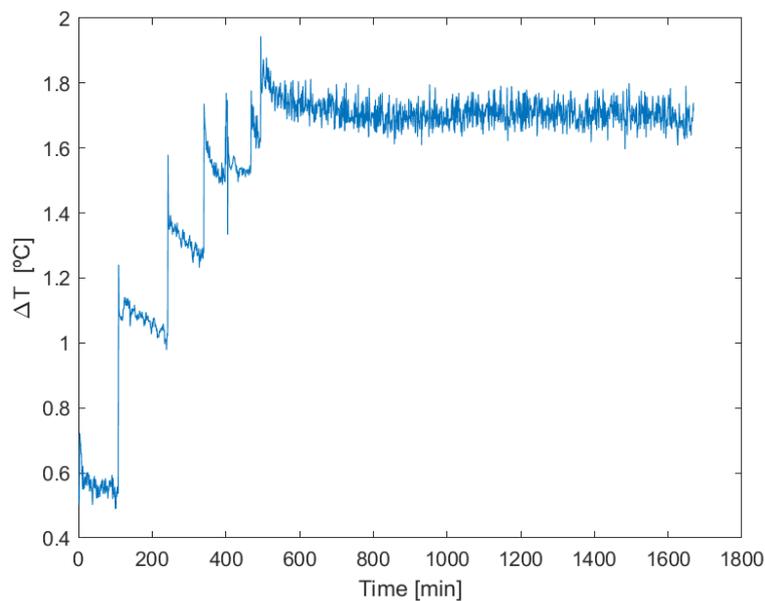


Figura 4.5: Gráfico do valor RMS do sinal diferença de temperaturas em função do tempo de duração do Teste de 12000 RPM.

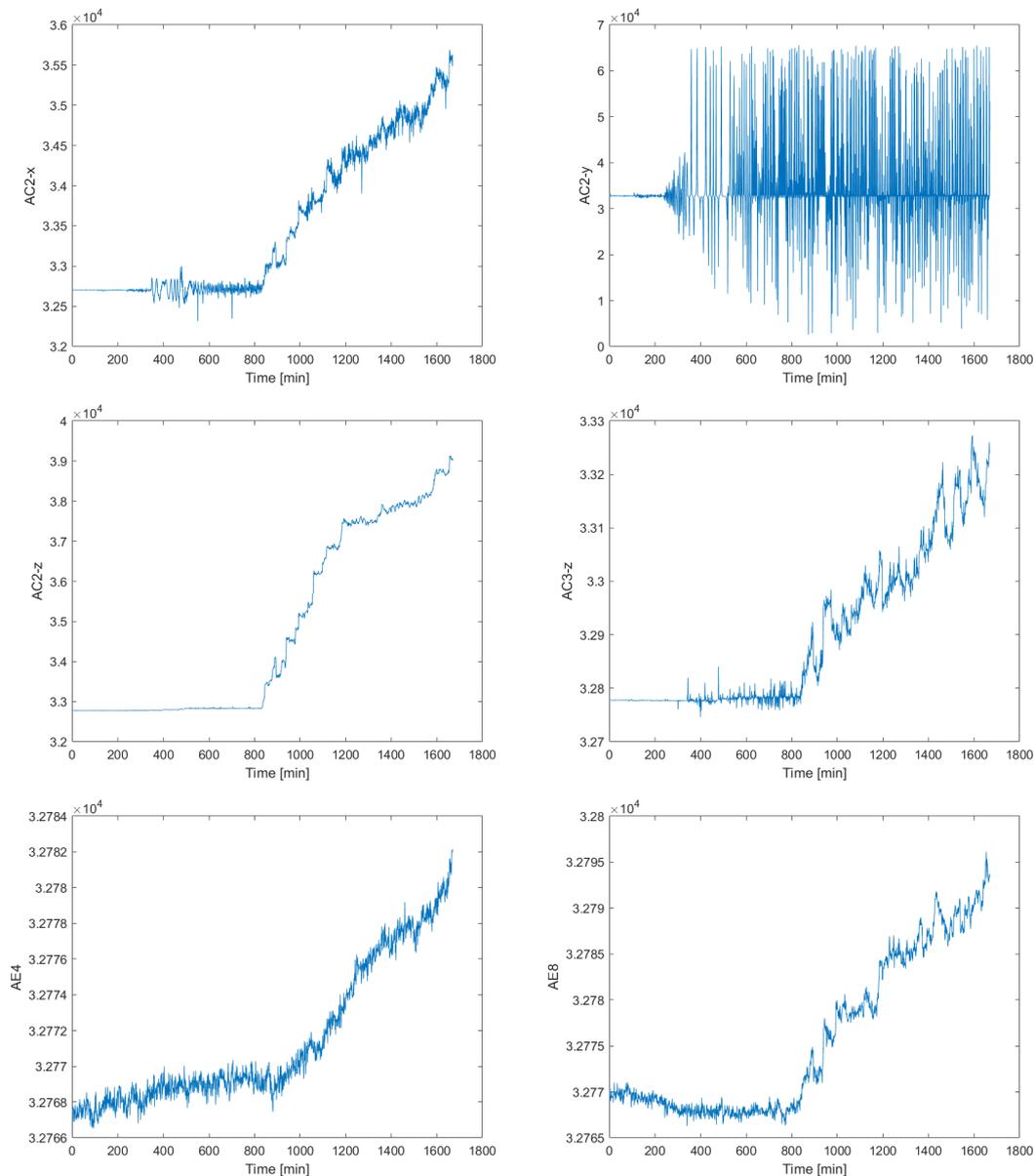


Figura 4.6: Gráficos do valor RMS do sinal em função do tempo para acelerómetros e sensores de emissão acústica para o Teste de 12000 RPM. Da esquerda para a direita apresentam-se, respetivamente: AC2-x e AC2-y (em cima), AC2-z e AC3 (ao centro) e AE4 e AE8 (em baixo).

Dos gráficos observados na figura 4.6 não é possível definir os diferentes níveis de vibração do equipamento de teste, característicos da variação na velocidade rotação tal como se sucede na Figura 4.5. já que a taxa de amostragem do sinais dos acelerómetros e sensores de emissão acústica é muito superior, pelo menos 3 ordens de grandeza, à dos sensores de temperatura. Apesar disso, com excepção do sensor AC2-y (gráfico no canto superior direito), todos os gráficos apresentam duas fases distintas. Numa primeira fase, as pequenas variações presentes nos sinais estão associadas ao ruído no sistema, sendo que na fase seguinte, além das pequenas oscilações do sinal, constata-se um aumento pro-

gressivo do valor RMS com o tempo de teste. O acentuar da vibração do sistema advém da intensificação dos defeitos presentes no rolamento por fadiga da estrutura dos seus componentes. Como se verifica no gráfico do sensor AC2-y, não é visível uma variação evidente na representação do sinal como sucede para os outros sensores. A justificação para o sucedido é a da medição do sinal de vibração ser feita segundo o eixo dos y, ou seja, direção azimutal. Nesta direção, por a velocidade de rotação não ser uniforme a correia de transmissão deslizava e saltava da sua posição preferencial e dessa forma influenciava a vibração sentida no rolamento. Por outro lado, apesar do ganho do amplificador de sinal deste sensor ter sido reduzido após a fase de validação dos sensores, o sinal saturava para altas velocidades de rotação quando existiam pequenas oscilações da velocidade.

4.2.2 Domínio das frequências

Após terem sido observados padrões e tendências nos sinais adquiridos pelos três tipos de sensores no domínio temporal que comprovavam a existência de falhas nos rolamentos testados, decidiu-se analisar os mesmos sinais no domínio das frequências de modo a consolidar o conhecimento adquirido sobre a evolução da condição destas componentes. Neste tipo de análise foram seguidas duas metodologias distintas com objetivos que apesar de serem diferentes se complementam e reúnem no objetivo principal do projeto, previsão de falhas em rolamentos. Nesta secção são apresentadas as duas metodologias utilizadas e os resultados obtidos com este tipo de análise. Para converter os sinais adquiridos no domínio do tempo para o das frequências utilizou-se a transformada rápida de Fourier (FFT), algoritmo muito eficiente para determinar quer a transformada de Fourier discreta (DTF) de um sinal quer a transformada inversa [41]. Este algoritmo foi oficialmente introduzido em 1965 por James Cooley e John Tukey. No entanto a invenção surgiu em 1805 por Carl Friedrich Gauss, físico e matemático alemão, quando estudava a trajetória de dois asteroides. A expressão matemática que é utilizada no cálculo da FFT de sinais discretos ($x[n]$) com N pontos é descrita na equação 4.3.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \times e^{-jk \frac{2\pi n}{N}}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (4.3)$$

4.2.2.1 Detecção de falhas

Nesta fase do projeto o objetivo de fazer uma análise de sinal no domínio das frequências era perceber se os padrões e as tendências que tinham sido observadas no domínio temporal se se repetiam para este domínio de análise ou se eram pelo menos semelhantes, de forma a confirmar a detecção de falhas da estrutura do rolamento. A metodologia utilizada durante este período foi muito idêntica à realizada no início do projeto, ou seja, os CIs selecionados baseavam-se mais uma vez em parâmetros estatísticos. No entanto a aplicação dos *condition indicators* restringiu-se apenas a determinados intervalos de frequência ao invés do espectro completo dos sinais. A seleção das regiões de frequência onde posteriormente são aplicados os CIs baseia-se nas larguras de banda dos sensores, valores estes que se encontram nas tabelas 3.2 e 3.3. Nas figuras 4.7 e 4.8 são apresentadas as representações gráficas obtidas para o Teste 0 e Teste 6 pela aplicação do RMS às bandas de frequência: 1 – 40 kHz dos acelerómetros; 30 – 150 kHz dos sensores de emissão acústica.

Da observação destes gráficos (figuras 4.7 e 4.8) comprova-se que as ilações retiradas sobre a condição do rolamento após a análise temporal são corroboradas pela análise no domínio das frequências. No caso do Teste 0 (figura 4.7) verificamos que para todos os gráficos temos o mesmo tipo de tendência. Os sinais analisados apresentam numa fase inicial uma região "plana" sem grandes variações sendo que numa fase mais avançada do teste a intensidade do sinal aumenta com o tempo de forma praticamente linear. No entanto, para os sensores AC2-x, AC2-z e AC3 observa-se que a fase de intensificação de sinal ocorre após existir uma transição bem nítida no instante 1065 minutos enquanto para o sensor de emissão acústica AE4 esta mesma transição verifica-se aos 1115 minutos. Relativamente ao Teste 6, com exceção do gráfico do sensor AC2-y (canto superior direito da Figura 4.8), todos os restantes gráficos evidenciam regiões de patamar onde a variação de sinal existente corresponde ao ruído do sistema, e uma região onde o valor RMS do sinal aumenta com o tempo. Os diferentes patamares observados correspondem a velocidades de rotação distintas do equipamento de teste antes de alcançar a velocidade pretendida de 12000 RPM. A primeira fase observada nestes sinais correspondente aos vários patamares está associada a uma condição normal de operação do rolamento que inicialmente se considera que tem um período de duração muito longo. Já a condição de degradação do rolamento está relacionada com o aumento progressivo do sinal ao longo do tempo sendo que no caso dos acelerómetros e do sensor de emissão acústica AE8 esta fase é precedida de duas transições mais significativas e nítidas, a primeira aos 837 minutos enquanto a segunda ocorre no instante 846 do tempo de teste.

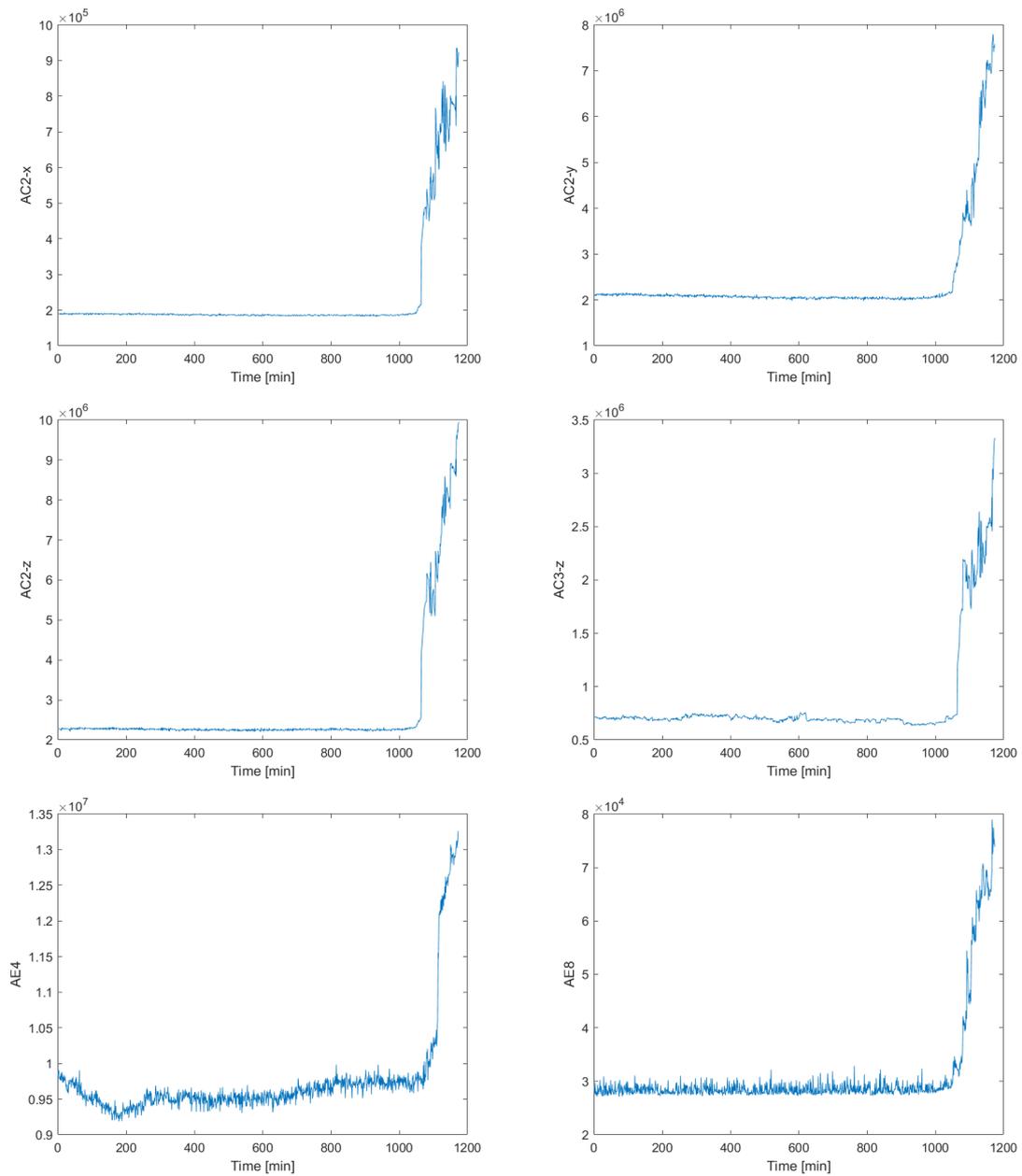


Figura 4.7: Gráficos do valor RMS do sinal em função do tempo nas bandas de frequência, 1 – 40 kHz (acelerómetros) e 30 – 150 kHz (sensores de emissão acústica) para o Teste de 6000 RPM. Da esquerda para a direita apresentam-se, respetivamente, os sensores: AC2-x e AC2-y (em cima); AC2-z e AC3 (ao centro); AE4 e AE8 (em baixo).

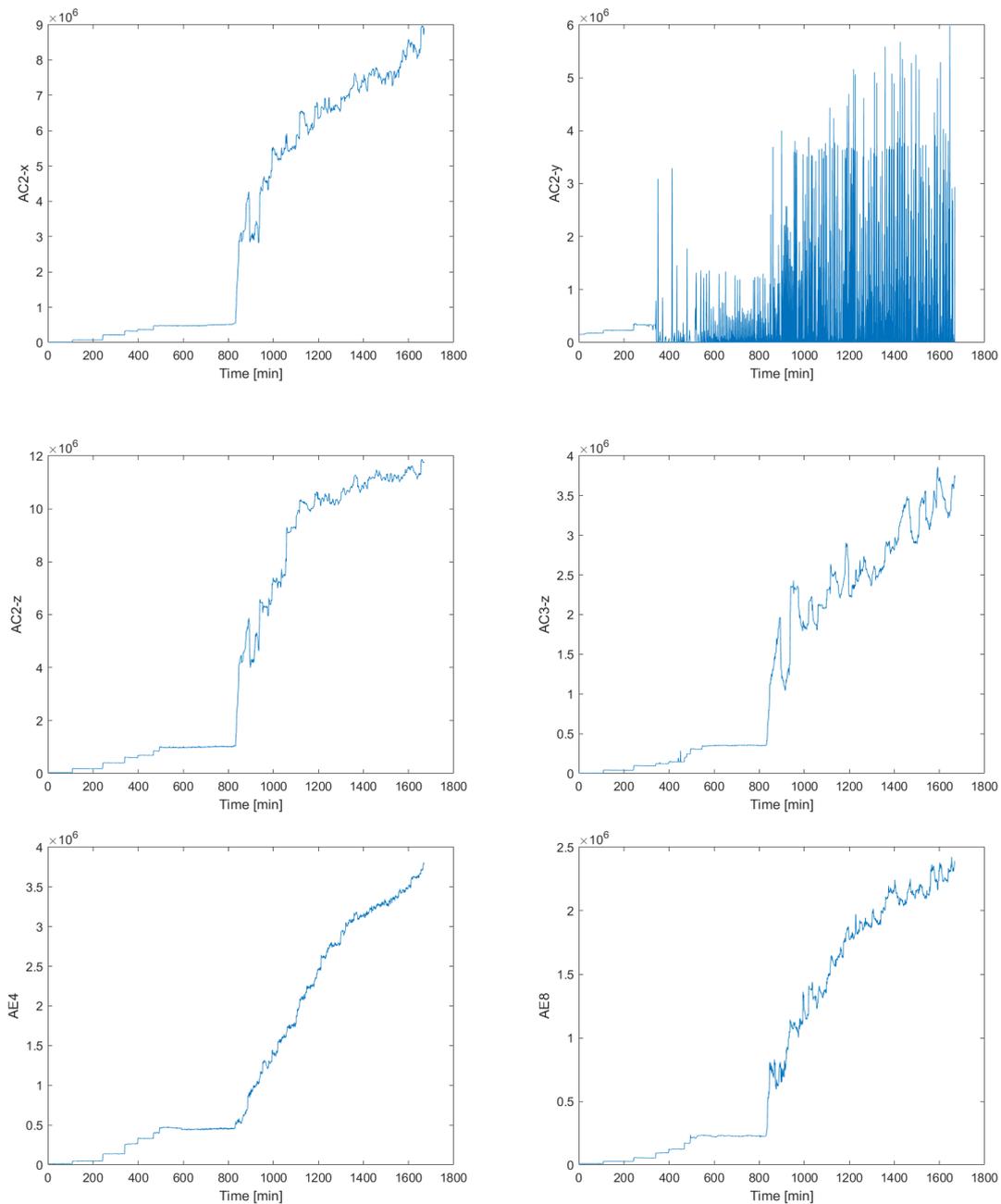


Figura 4.8: Gráficos do valor RMS do sinal em função do tempo nas bandas de frequência, 1 – 40 kHz (acelerómetros) e 30 – 150 kHz (sensores de emissão acústica) para o Teste de 12000 RPM. Da esquerda para a direita apresentam-se, respetivamente, os sensores: AC2-x e AC2-y (em cima); AC2-z e AC3 (ao centro); AE4 e AE8 (em baixo).

4.2.2.2 Identificação do tipo de falha

Após uma análise em determinadas bandas de frequência, subsecção 4.2.2.1, que corroborava os resultados obtidos para o domínio temporal, determinou-se que a tarefa seguinte deveria continuar no domínio de análise do espaço das frequências. Contudo, as frequências a analisar seriam em regiões muito específicas em vez dos intervalos amplos anteriormente

considerados. Este tipo de análise tem como principal objetivo a identificação do tipo de falha encontrada no rolamento. Para isso, as frequências específicas escolhidas estão relacionadas com as frequências naturais de um rolamento quando este está sujeito a um movimento de rotação contínuo. Os valores destas frequências foram determinados com base na tabela 4.1, fornecida pela Barden através do *software* BEARINX[®]-online da Schaeffler. Tendo em conta que existem variações da velocidade de rotação do teste relativamente aos valores previamente considerados, fez-se uma regressão linear aos valores desta tabela de forma a obter as frequências correspondentes à velocidade real de rotação do eixo. A nomenclatura destas frequências (Tabela 4.1) é a seguinte: os números representam o número de modos de vibração do sistema que produzem a frequência, ou seja, 2pt = elíptico, 3pt = triangular, 4pt = quadrangular e assim sucessivamente; SR e RR (do inglês *Static Ring* e *Rotating Ring*) significam anel estático e rotativo, respetivamente; (S) representa uma sub-frequência em vez da frequência principal. No projeto iBearing, o anel que roda é o anel interno do rolamento enquanto o anel externo permanece estático.

Na literatura analisada apenas são apresentadas quatro frequências naturais de um rolamento, relativas às quatro componentes que o constituem (ver Figura 4.9). Estas frequências são a Cage Fault Frequency (CFF) (frequência natural da "gaiola"), a frequência de rotação de uma esfera (do inglês Ball Spin Frequency (BSF)), a Ball Pass Frequency Outer (race) (BPFO) e a Ball Pass Frequency Inner (race) (BPFI) que descrevem a frequência de passagem da esfera no anel externo e interno, respetivamente. Geralmente, os valores destas frequências são determinados de forma aproximada com base em equações onde os parâmetros dependem das dimensões dos rolamentos e da velocidade de rotação do eixo [42, 43]. Porém, neste contexto, o *software* da Schaeffler determinou através de um modelo numérico não só as quatro frequências mais encontradas na literatura como também 31 novas frequências naturais dos modos de vibração verificados em rolamentos.

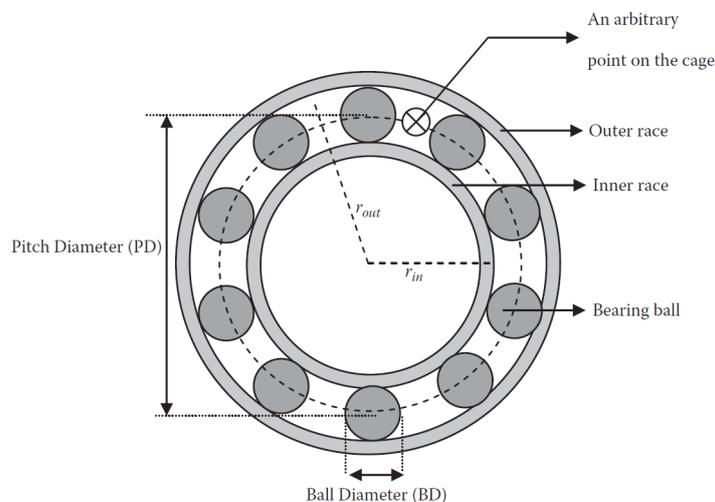


Figura 4.9: Geometria típica de um rolamento de esferas [44].

Tabela 4.1: Tabela com as frequências naturais de um rolamento de 19 esferas para diferentes velocidades de rotação do equipamento de teste, fornecida pela Barden (Schaeffler).

FREQUÊNCIAS	Velocidade de rotação do <i>test rig</i> (RPM)									
	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000
19pt.RR(S)	4	8	11	15	19	23	26	30	34	38
Cage	15	30	44	59	74	89	103	118	133	148
1,19pt.SR(S)	30	59	89	118	148	177	207	236	266	296
1,19pt.RR(S)	33	67	100	133	167	200	233	267	300	333
Single Ball Defect	251	503	754	1005	1256	1508	1759	2010	2261	2513
2,3,6,9,18pt.SR(S)	281	562	842	1123	1404	1685	1966	2247	2527	2808
1pt.SR	281	562	842	1123	1404	1685	1966	2247	2527	2808
OR Ball Pass Freq	281	562	843	1124	1405	1686	1967	2248	2530	2811
4,5,10,20pt.SR(S)	310	621	931	1242	1552	1862	2173	2483	2794	3104
2,3,6,9,18pt.RR(S)	319	638	958	1277	1596	1915	2234	2553	2873	3192
1pt.RR	353	705	1058	1410	1763	2115	2468	2820	3173	3525
IR Ball Pass Freq	353	705	1058	1410	1763	2115	2468	2820	3173	3525
4,5,10,20pt.RR(S)	386	772	1158	1543	1929	2315	2701	3087	3473	3858
2pt.SR	562	1123	1685	2247	2808	3370	3932	4493	5055	5617
13pt.SR(S)	591	1182	1774	2365	2956	3547	4139	4730	5321	5912
7,8,14pt.SR(S)	705	1410	2115	2820	3525	4230	4935	5640	6345	7050
3pt.SR	738	1477	2215	2953	3692	4430	5168	5907	6645	7383
2pt.RR	813	1626	2439	3252	4065	4878	5691	6503	7316	8129
13pt.RR(S)	842	1685	2527	3370	4212	5055	5897	6740	7582	8425
15pt.SR(S)	1024	2048	3073	4097	5121	6145	7169	8193	9218	10242
4pt.SR	1058	2115	3173	4230	5288	6345	7403	8460	9518	10575
11pt.SR(S)	1094	2188	3281	4375	5469	6563	7656	8750	9844	10938
7,8,14pt.RR(S)	1123	2247	3370	4493	5617	6740	7863	8987	10110	11233
3pt.RR	1153	2306	3459	4612	5764	6917	8070	9223	10376	11529
5pt.SR	1377	2753	4130	5507	6883	8260	9637	11013	12390	13767
12,16pt.SR(S)	1404	2808	4212	5617	7021	8425	9829	11233	12637	14042
6pt.SR	1410	2820	4230	5640	7050	8460	9870	11280	12690	14100
15pt.RR(S)	1434	2867	4301	5735	7169	8602	10036	11470	12903	14337
4pt.RR	1443	2887	4330	5773	7217	8660	10103	11547	12990	14433
11pt.RR(S)	1685	3370	5055	6740	8425	10110	11795	13480	15165	16850
5pt.RR	1763	3525	5288	7050	8813	10575	12338	14100	15863	17625
17pt.SR(S)	1796	3592	5388	7183	8979	10775	12571	14367	16163	17958
12,16pt.RR(S)	2115	4230	6345	8460	10575	12690	14805	16920	19035	21150
6pt.RR	2276	4552	6829	9105	11381	13657	15933	18210	20486	22762
17pt.RR(S)	2853	5707	8560	11413	14267	17120	19974	22827	25680	28534

Com base nos valores teóricos das frequências naturais de um rolamento determinadas através da regressão linear calcularam-se as frequências esperadas assim como a amplitude e a frequência média de cada uma delas para cada minuto de aquisição de sinal. Para este propósito foi implementada uma função em Matlab designada por *faultfrequencies* (ver apêndice A.2). Através do sinal representado no domínio das frequências, a função determina o valor máximo com base no valores da frequência teórica e da largura do intervalo previamente considerado. Adicionalmente esta função indica a frequência correspondente ao valor máximo para efeitos de comparação dos valores determinados com os valores teóricos. A partir deste valor da frequência e da largura do intervalo a função faz ainda uma integração na gama de frequências pretendida de modo a determinar o valor da frequência média. A largura do intervalo considerado para cada uma das frequências varia com o valor teórico de cada frequência para que nas altas frequências haja um intervalo mais amplo.

Nas figuras 4.10 e 4.11 são apresentados os resultados da análise de sinal das frequências naturais do rolamento realizada para os sensores AC3 e AE8 para o Teste 0 enquanto as figuras 4.12 e 4.13 ilustram os mesmos resultados para o Teste 6. Nestes gráficos são representados em função do tempo de aquisição os valores da amplitude das quatro frequências naturais de rolamentos mais estudadas na literatura, isto é, CFF, BSF, BPFO e BPF1.

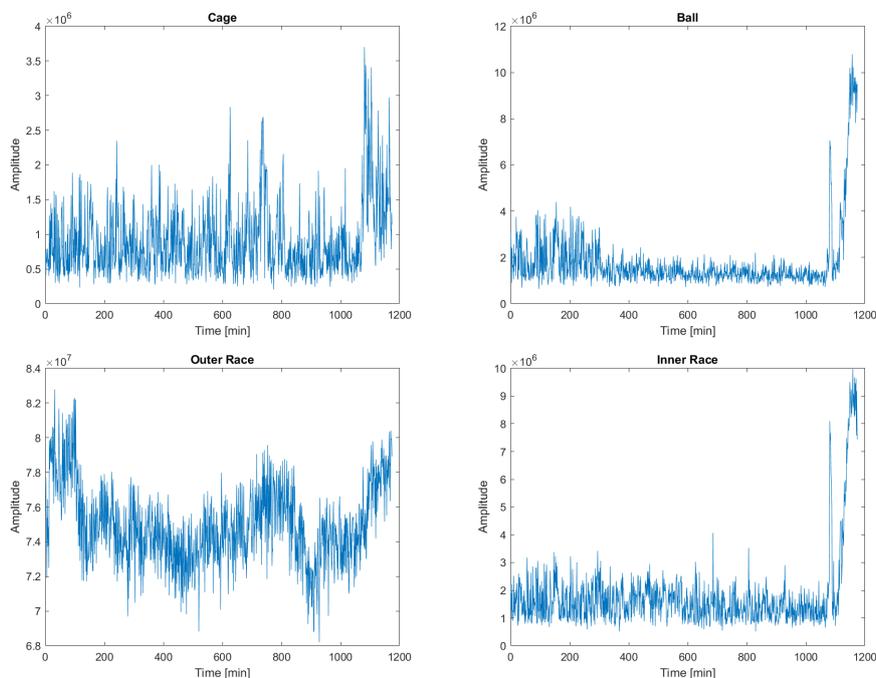


Figura 4.10: Representações gráficas das amplitudes das frequências naturais do rolamento em função do tempo para o sensor AC3 e Teste de 6000 RPM. Na linha superior temos as frequências naturais da "Gaiola" (esquerda) e Esfera (direita) enquanto na inferior são apresentadas as frequências naturais dos anéis exterior (esquerda) e interior (direita).

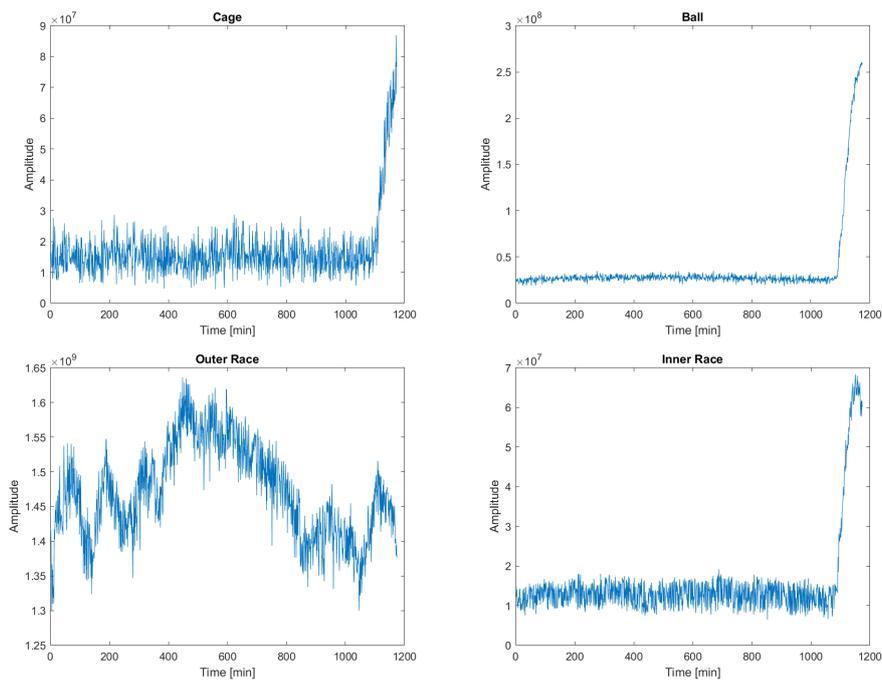


Figura 4.11: Representações gráficas das amplitudes das frequências naturais do rolamento em função do tempo para o sensor AE8 e Teste de 6000 RPM. Na linha superior temos as frequências naturais da "Gaiola" (esquerda) e Esfera (direita) enquanto na inferior são apresentadas as frequências naturais dos anéis exterior (esquerda) e interior (direita).

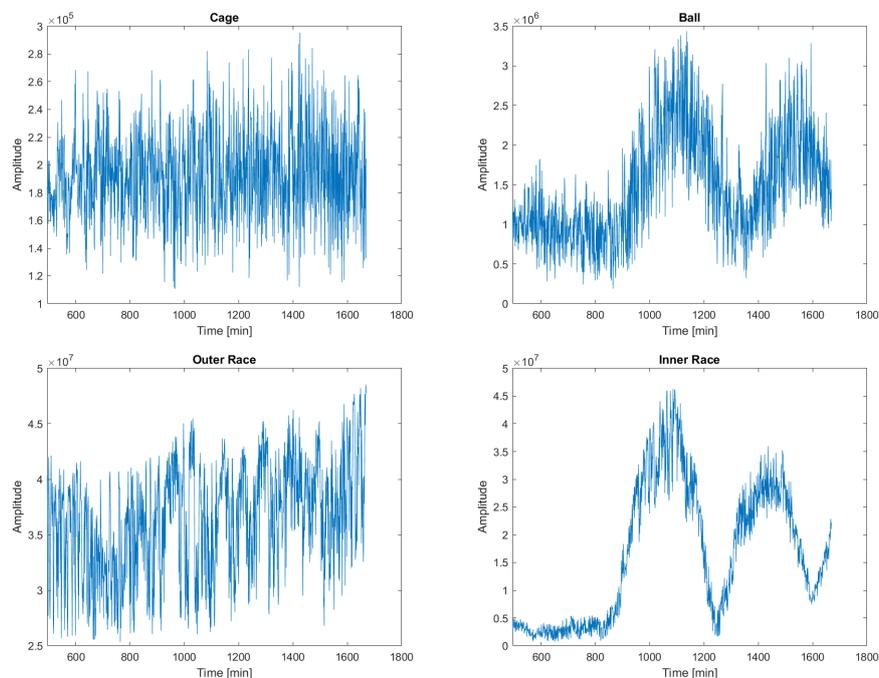


Figura 4.12: Representações gráficas das amplitudes das frequências naturais do rolamento em função do tempo para o sensor AC3 e Teste de 12000 RPM. Na linha superior temos as frequências naturais da "Gaiola" (esquerda) e Esfera (direita) enquanto na inferior são apresentadas as frequências naturais dos anéis exterior (esquerda) e interior (direita).

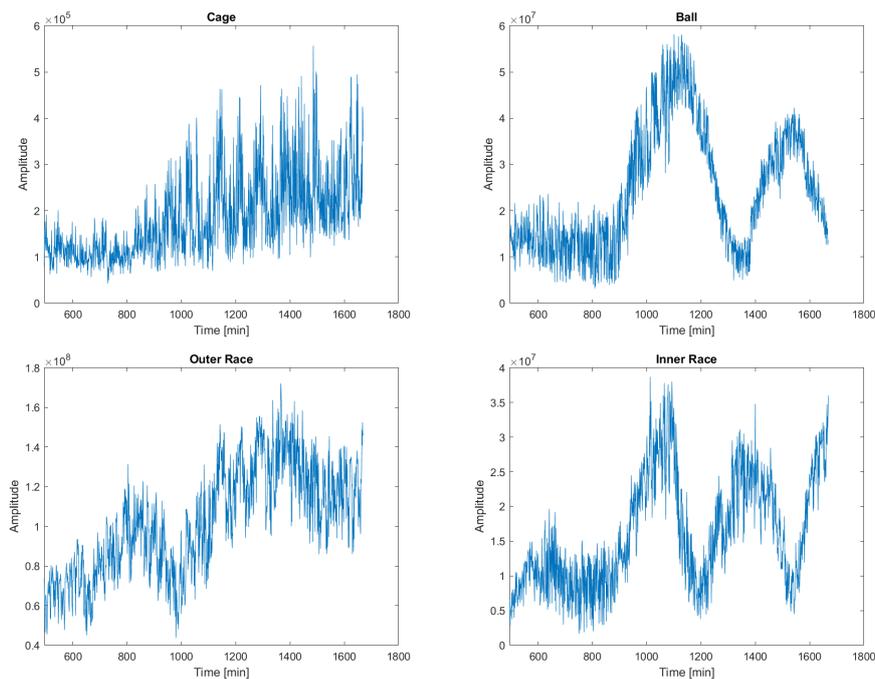


Figura 4.13: Representações gráficas das amplitudes das frequências naturais do rolamento em função do tempo para o sensor AE8 e Teste de 12000 RPM. Na linha superior temos as frequências naturais da "Gaiola" (esquerda) e Esfera (direita) enquanto na inferior são apresentadas as frequências naturais dos anéis exterior (esquerda) e interior (direita).

Da observação das figuras apresentadas acima podemos retirar conclusões sobre a posição da degradação presente no rolamento. Apesar de ser uma análise ainda muito primitiva e elementar, é possível concluir desde já que em caso de presença de falha no rolamento esta não se encontra no anel externo. Esta conclusão plausível justifica-se por não ser visível para os dois sensores, AC3 e AE8, nenhuma variação evidente no sinal da frequência natural desta componente (BPFO) que sugira uma possível degradação da mesma. Esta afirmação é aceitável uma vez que os dois sensores selecionados têm boa sensibilidade para a região de frequências analisadas e porque no caso do acelerômetro a componente que está a ser medida é a da direção radial (z). Quer para o Teste 0 quer para o Teste 6 constatamos que os gráficos das frequências BSF e BPF1 apresentam um padrão que sugere a presença de degradação nestas componentes. Apesar de conseguirmos restringir as opções para a localização da falha no rolamento, não é ainda possível afirmar com certeza qual das componentes se encontra degradada já que foram analisados apenas os resultados de dois dos sensores utilizados para a aquisição de sinal. Deste modo, é necessário analisar os dados obtidos com o acelerômetro AC2 e com o sensor de emissão acústica AE4 de forma a confirmar a verdadeira localização da falha e a validar a afirmação feita sobre o anel externo do rolamento permanecer saudável após a execução dos testes.

Assim, foi aplicado o mesmo procedimento aos restantes sensores, acelerômetro AC2 (nas três componentes, x, y e z) e sensor de emissão acústica AE4. No final foi cons-

truída uma tabela para cada um dos testes onde é feita uma análise qualitativa para todas as frequências do rolamento (ver a Tabela 4.1) e os vários sensores utilizados. Na construção das tabelas o objetivo consiste em classificar os sinais de amplitude de cada uma das frequências relativamente ao padrão observado. Deste modo, foram consideradas três classificações distintas correspondentes a uma cor diferente. A cor verde corresponde a sinais onde são visíveis padrões nítidos e tendências que evoluem com o tempo de teste, a cor vermelha representa os sinais onde não é perceptível qualquer tipo de tendência enquanto a cor amarela classifica as situações intermédias, ou seja, sinais onde é visível uma tendência evolutiva embora não seja perfeitamente evidente. Após esta classificação de cariz qualitativo, procedeu-se a uma análise mais pormenorizada. Para isso, definiram-se três requisitos relativamente aos padrões observados. O primeiro requisito serve para verificar a existência de um planalto no sinal, isto é, uma região onde o sinal se mantém constante apenas com flutuações associadas ao ruído do sistema, sendo designada pela letra P. Posteriormente, foi adicionada a letra T aos sinais que apresentavam uma transição nítida e bem definida após a fase constante. Por último, ao verificarmos a presença de oscilações semelhantes a uma senoide em alguns dos padrões anteriormente classificados, registamos essas oscilações com a letra O e quantificamo-las com um algarismo correspondente ao número de sinusoides observadas no sinal.

Relativamente ao Teste 0 (Teste de 6000 RPM) conclui-se que a frequência natural do anel exterior (BPFO) está sempre a vermelho, independentemente do sensor que está a ser analisado enquanto para o anel interior verifica-se o oposto, está quase sempre classificado com a cor verde. Quanto às componentes x e y do acelerómetro AC2, apesar de estas medirem a vibração segundo a direção axial e tangencial, respetivamente, a informação é coerente com a informação dos outros sensores. Para a situação dos sensores de emissão acústica, comprovamos a vantagem do AE8 sobre o AE4 já que o primeiro é capaz de medir a emissão acústica para baixas frequências como é o caso das frequências analisadas enquanto o segundo tem melhor desempenho numa gama de frequências mais elevada. Para o Teste 6 (Teste de 12000 RPM) os resultados mais importantes são a frequência natural do anel exterior estar quase sempre a vermelho enquanto a do anel interno estar sempre a verde com exceção da componente y do acelerómetro AC2. Neste teste comprova-se que a direção tangencial da vibração (componente y do acelerómetro AC2) não contém informação relevante pois nesta direção devido a pequenas oscilações ocorre frequentemente saturação do sinal. A interpretação destes resultados será feita no Capítulo 5, onde são apresentadas as duas tabelas construídas segundo a abordagem exposta acima.

Capítulo 5

Discussão

Neste projeto desenvolveu-se um algoritmo para analisar os dados relativos à condição de um rolamento durante o seu tempo de vida com o objetivo de detetar e diagnosticar falhas. Este algoritmo é dividido em duas fases distintas. A primeira fase serve para detetar falhas em rolamentos enquanto na segunda é indicada a localização das mesmas. Para isso, os domínios de análise de sinal, no domínio do tempo e no espaço de frequências, têm um papel preponderante. Este algoritmo utiliza dados de vibração e emissão acústica com uma resolução de 16 bits. Não é feita a calibração dos dados destes sensores uma vez que após esse processo a memória ocupada seria muito superior comparativamente à que é preenchida antes da calibração (números inteiros vs números reais). Além disso, como o objetivo deste algoritmo é detetar tendências e padrões nos sinais analisados e comparar valores em cada um deles, é irrelevante se estes estão ou não calibrados. Assim, a análise realizada será sempre uma análise de sinal relativa ao invés de uma análise dos valores absolutos da vibração e emissão acústica do rolamento. No entanto, considera-se importante referir alguns valores absolutos para que se tenha uma noção da vibração real sentida pelo rolamento. No caso do Teste 0 para o modo normal de funcionamento o rolamento foi sujeito a vibrações tipicamente de 10 G enquanto no modo de degradação estes valores atingiram aproximadamente os 15 G. Já para o Teste 6 o rolamento esteve sujeito a vibrações próximas de 20 G num modo de operação normal alcançando valores próximos dos 30 G durante a fase de degradação.

5.1 Domínio do tempo

Da análise de sinal no domínio temporal detetam-se padrões que indicam a degradação da estrutura dos rolamentos testados para os diferentes sensores utilizados: temperatura; acelerómetros; sensores de emissão acústica. Através deste domínio de análise comprova-se que a falha é detetada primeiro pelos acelerómetros e sensores de emissão acústica e só depois é que ocorre uma variação da temperatura do rolamento, como é previsto pela teoria de CBM. Neste domínio de análise, para o Teste de 6000 RPM é possível observar uma

transição significativa nos sinais para o instante de tempo 1065 minutos que sugere o início da degradação do rolamento. No entanto, para alguns CIs, como por exemplo a curtose, existe uma variação no sinal que antecede esta transição sendo visível aproximadamente ao instante 1055 minutos. Relativamente ao Teste de 12000 RPM as primeiras variações de sinal mais perceptíveis surgem por volta do instante 835 minutos. Embora estes instantes de deteção da falha resultem da observação e subjetividade de um observador, possibilitam desde logo uma interpretação da evolução da degradação do rolamento.

5.2 Domínio das frequências

Como foi referido no capítulo anterior, com este domínio de análise foi possível realizar duas abordagens diferentes para a deteção e previsão de falhas em rolamentos. A primeira abordagem corroborou os resultados obtidos com a análise de sinal no domínio temporal, ou seja, confirmou a degradação estrutural dos rolamentos verificada anteriormente quer para os dois acelerómetros quer para os dois sensores de emissão acústica. Além disso, tal como no domínio temporal, a análise visual permitiu determinar o instante de deteção da falha para cada um dos sensores utilizado, ainda que de uma forma pouco fiável.

Relativamente à segunda abordagem, esta permitiu diagnosticar o tipo de falha presente no rolamento: através da análise de sinal considerada e apresentada na subsecção 4.2.2.2 foi possível concluir qual a localização da falha detetada nos rolamentos. Ao observarmos a figura 5.1, referente ao Teste 0, constatamos que existem dois grupos de frequências que indicam a presença de falha no rolamento. Relembrando que para o tipo de rolamentos utilizados neste projeto o anel interno é o anel que tem movimento de rotação (designado por RR) enquanto o anel exterior permanece estático (SR), verificamos que no primeiro grupo todas as frequências estão associadas a modos de vibração do anel interno. O segundo grupo correspondente a frequências mais elevadas abrange desde a frequência "7, 8, 14pt.SR(S)" até à última frequência apresentada na tabela 4.1, designada por "17pt.RR(S)". Com base na informação obtida através destes dois grupos conclui-se que no final do teste a degradação no rolamento ocorre no seu anel interno.

Para o Teste 6 a figura 5.2 ilustra para todos sensores com exceção da componente y do acelerómetro triaxial (AC2) duas fases distintas. Numa primeira fase, para frequências até à frequência de passagem das esferas no anel externo do rolamento (BPFO), não é visível para dois ou mais sensores em simultâneo nenhum tipo de tendência. No entanto, para frequências superiores à BPFO surgem variações elucidativas da degradação estrutural do rolamento. Embora para a frequência designada por "4, 5, 10, 20pt.SR(S)" se observem em alguns dos sensores estas variações de sinal, constatamos novamente que no grupo das frequências associadas ao anel interno (frequências 10, 11, 12 e 13 da tabela 4.1) todos os sensores confirmam a degradação do rolamento. Deste modo, tal como sucede para o Teste 0 conclui-se que a degradação do rolamento utilizado no Teste 6 ocorre no anel interno. Além disso, através da observação dos sinais das amplitudes das frequências

naturais do rolamento em função dos tempos de teste e das figuras 5.1 e 5.2 conclui-se que as falhas presentes nos rolamentos estão relacionadas com o efeito *spalling*, ou seja, fragmentação do material devido ao excesso de carga aplicada aos rolamentos. Considera-se que a fragmentação da estrutura do rolamento e a expelição destes fragmentos estão relacionadas com as oscilações observadas nos sinais das frequências naturais do rolamento. Assim, à fase crescente da senoide associamos a fragmentação da estrutura do rolamento e a passagem das esferas na região degradada. Ao passarem pela região fragmentada as esferas intensificam a vibração sentida pelo rolamento já que induzem vibração adicional nas estruturas degradadas. Relativamente à fase descendente considera-se que esta esteja relacionada com a erosão dos fragmentos do material do rolamento.

Na figura 5.3 são ilustradas duas imagens dos rolamentos após a realização dos ensaios destrutivos no equipamento de teste L36. Na imagem da esquerda encontra-se o rolamento utilizado para o Teste 0 enquanto a da direita refere-se ao rolamento do Teste 6. Como se comprova nestas duas imagens, a degradação evidente nos rolamentos localiza-se nos seus anéis internos sendo visível um percurso de fadiga pela contínua passagem das esferas na região em que se encontra a falha. Assim, com as diferentes abordagens utilizadas durante este trabalho não só é possível detetar a presença de falhas em rolamentos como também concluir sobre a origem da mesma. Fazer este tipo de diagnóstico é relevante para a compreensão do normal funcionamento do rolamento e otimizar o processo de manutenção/substituição do mesmo.

FREQUÊNCIAS		SENSORES					
		AC2x	AC2y	AC2z	AC3z	AE4	AE8
1	19pt.RR(S)			P, T			
2	Cage						P, T
3	1,19pt.SR(S)			P			
4	1,19pt.RR(S)						
5	Single Ball Defect			P	P		P, T
6	2, 3, 6, 9, 18pt.SR(S)						
7	1pt.SR						
8	OR Ball Pass Freq						
9	4, 5, 10, 20pt.SR(S)						
10	2, 3, 6, 9, 18pt.RR(S)	P, T	P, T	P	P		P, T
11	1pt.RR	P, T	P, T	P, T	P		P, T
12	IR Ball Pass Freq	P, T	P, T	P, T	P		P, T
13	4, 5, 10, 20pt.RR(S)	P, T	P, T	P, T	P		P, T
14	2pt.SR						
15	13pt.SR(S)						P, T
16	7, 8, 14pt.SR(S)	P, T, O1					
17	3pt.SR	P, T, O1	P, T, O1	P, T, O1	P, T, O1	P, O1	P, T, O1
18	2pt.RR	P, T, O1	P, T, O1	P, T, O1	P, T, O1		P, T, O1
19	13pt.RR(S)	P, O1	P	P	P, T, O1		P, T, O1
20	15pt.SR(S)	P, T, O2					
21	4pt.SR	P, T, O2					
22	11pt.SR(S)	P, T, O2					
23	7, 8, 14pt.RR(S)	P, T, O2	P, T, O2	P, T, O2	P, T, O2		P, T, O2
24	3pt.RR	P, T, O2	P, T, O2	P, T, O2	P, T, O2	P, O2	P, T, O2
25	5pt.SR	P, T, O2					
26	12, 16pt.SR(S)	P, T, O3	P, T, O3	P, O3	P, T, O3	P, T, O2	P, T, O3
27	6pt.SR	P, T, O3	P, T, O3	P, O3	P, T, O3	P, T, O3	P, T, O3
28	15pt.RR(S)	P, T, O3					
29	4pt.RR	P, T, O3					
30	11pt.RR(S)	P, T, O4	P, T, O4	P, T, O3	P, T, O4	P, T, O3	P, T, O4
31	5pt.RR	P, T, O4					
32	17pt.SR(S)	P, T, O4					
33	12, 16pt.RR(S)	P, T, O4		P, T, O4	P, T, O4	P, T, O4	P, T, O4
34	6pt.RR	P, T, O2	P, T	P, T, O2	P, T, O5	P	P, T, O4
35	17pt.RR(S)	P, T, O3	P, T, O3	P, T, O4	P, T, O4	P, T, O2	P, T, O3

Figura 5.1: Análise de todas as frequências com os diferentes sensores para o Teste de 6000 RPM. O código de cores é o seguinte: Verde (tendências evidentes), Amarelo (perceptíveis mas não evidentes) e Vermelho (tendências imperceptíveis). As letras P, T e O significam a presença de um Planalto (região onde o sinal se mantém "constante"), de uma Transição bem definida e de Oscilações, respectivamente, e o número refere-se ao número de oscilações presentes.

FREQUÊNCIAS		SENSORES					
		AC2x	AC2y	AC2z	AC3z	AE4	AE8
1	19pt.RR(S)			P			
2	Cage			P			
3	1,19pt.SR(S)	P		P	P, T	P	
4	1,19pt.RR(S)						
5	Single Ball Defect			P, O1	P, O2	P	P, O2
6	2, 3, 6, 9, 18pt.SR(S)					P	
7	1pt.SR					P	
8	OR Ball Pass Freq					P	
9	4, 5, 10, 20pt.SR(S)	P, O1		P, O2		P	P, O2
10	2, 3, 6, 9, 18pt.RR(S)	P, T, O2		P, T, O2	P, T, O2	P	P, T, O2
11	1pt.RR	P, T, O2		P, T, O2	P, T, O2	P	P, T, O2
12	IR Ball Pass Freq	P, T, O2		P, T, O2	P, T, O2	P	P, O2
13	4, 5, 10, 20pt.RR(S)	P, O1		P, O2	P, O2	P	P, O2
14	2pt.SR	P		P		P	
15	13pt.SR(S)	P		P, T	P, O4	P	P, O4
16	7, 8, 14pt.SR(S)	P, T, O4		P, T, O4	P, T, O4	P	P, T, O4
17	3pt.SR	P, T, O5		P	P, T, O5	P	P, T, O5
18	2pt.RR	P, O2		P	P, T, O5	P	P, T, O6
19	13pt.RR(S)	P		P	P, T	P	P, T
20	15pt.SR(S)	P, T, O6		P, T, O6	P, T, O6	P	P, T, O7
21	4pt.SR	P		P, T, O6	P, T, O7	P	P, T, O7
22	11pt.SR(S)	P		P	P, T, O7	P	P, T, O7
23	7, 8, 14pt.RR(S)	P		P	P, T	P	P, T
24	3pt.RR	P, T, O7		P, T, O7	P, T, O7	P, O6	P, T, O7
25	5pt.SR	P, T, O9		P, T, O8	P, T, O9	P	P, T, O8
26	12, 16pt.SR(S)	P		P	P, T	P, T	P, T
27	6pt.SR	P		P	P, T	P, T	P, T
28	15pt.RR(S)	P, T, O6		P, T, O8	P, T, O9	P, T, O8	P, T, O9
29	4pt.RR	P, T, O7		P, T, O9	P, T, O9	P, T, O8	P, T, O9
30	11pt.RR(S)	P, T		P, T	P, T	P, T	P, T
31	5pt.RR	P, T, O10		P, T, O10	P, T, O10	P, T, O10	P, T, O10
32	17pt.SR(S)	P, T, O10		P, T, O10	P, T, O10	P, T, O10	P, T, O10
33	12, 16pt.RR(S)	P, T, O12		P, T, O8	P, T, O8	P, T, O13	P, T, O15
34	6pt.RR	P		P	P	P	P, T
35	17pt.RR(S)	P, T		P, T	P, T	P, T	P, T

Figura 5.2: Análise de todas as frequências com os diferentes sensores para o Teste de 12000 RPM. Legenda igual à Figura 5.1 mas para o Teste 6.

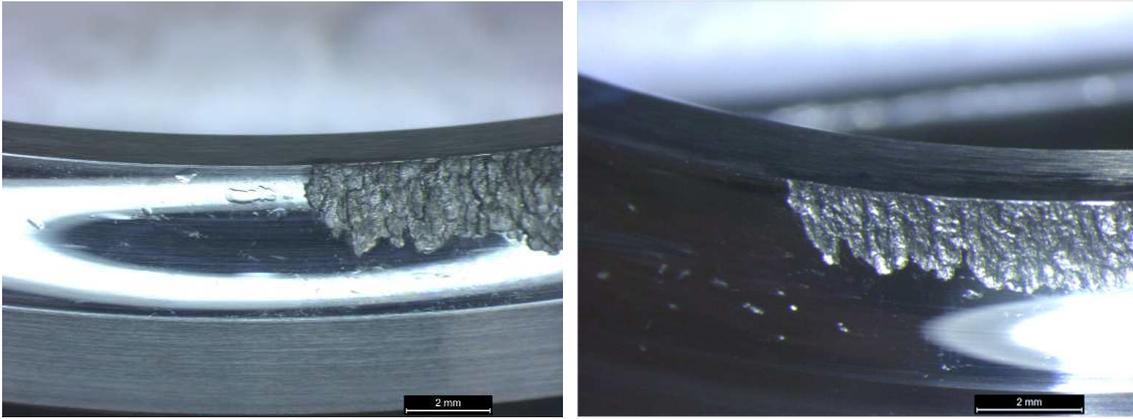


Figura 5.3: Características de falha dos rolamentos. A imagem do lado esquerdo corresponde ao Teste de 6000 RPM enquanto a da direita ao de 12000 RPM. Crédito: consórcio iBearing [35].

De forma a compreender se existe algum tipo de relação entre os sinais dos diversos sensores determinaram-se os coeficientes de correlação para os acelerómetros e sensores de emissão acústica. A correlação de sinais foi feita com dados de sensores do mesmo tipo (acelerómetros com acelerómetros ou emissão acústica com emissão acústica) assim como através de dados de sensores diferentes (acelerómetros com emissão acústica). Na estatística descritiva o coeficiente de correlação de Pearson mede o grau da correlação entre duas variáveis assim como a sua direção, ou seja, se é positiva ou negativa. Geralmente, este coeficiente é representado pela letra grega ρ e o seu valor está sempre compreendido no intervalo $[-1,1]$. Quando ao correlacionarmos duas variáveis obtemos $\rho = 1$ isso significa que estas estão correlacionadas perfeita e positivamente enquanto na situação em que $\rho = -1$ as mesmas variáveis têm uma correlação negativa perfeita. Isto significa que no primeiro caso as duas variáveis variam da mesma forma, ou seja, aumentam ou diminuem em simultâneo. Contrariamente, na segunda situação ($\rho = -1$) as variáveis têm uma variação oposta, isto é, se uma aumenta a outra diminui. A equação 5.1 descreve a expressão utilizada para determinar o coeficiente de correlação entre duas variáveis [45],

$$\rho(A,B) = \frac{1}{N-1} \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - \mu_A)(B_i - \mu_B)}{\sigma_A \sigma_B} \quad (5.1)$$

onde A e B são as duas variáveis a correlacionar, N o número de pontos, μ_A , σ_A , μ_B e σ_B a média e o desvio padrão das variáveis A e B, respetivamente.

Nas tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados os valores dos coeficientes de correlação determinados entre a direção radial (componente z) dos acelerómetros e os sensores de emissão acústica. Para determinar os valores da correlação dos sensores para os diferentes testes foram considerados os dados das amplitudes medidas através da função apresentada no apêndice A.2 e utilizou-se o comando *corrcoef()* do Matlab. Cada um dos sensores conside-

rados corresponde a uma matriz com 35 colunas (relativas às 35 frequências do rolamento apresentadas na tabela 4.1) e com o número de linhas igual ao tempo de aquisição de cada teste, ou seja, 1174 linhas no caso do Teste 0 e 1669 para o Teste 6. Nas entradas destas matrizes encontram-se os valores da amplitude para cada uma das frequências em cada instante de aquisição. Embora o Teste 6 dure 1669 minutos, o *test rig* só começou a rodar com uma velocidade de rotação de 12000 RPM a partir do minuto 495 o que significa que para o cálculo dos coeficientes de correlação apenas foram considerados os valores das amplitudes apresentados nas últimas 1175 linhas da matriz (da linha 495 à linha 1669). Assim sendo, para facilitar a compreensão dos resultados obtidos é indicado nas tabelas seguintes o número de pontos considerados em cada dimensão das duas matrizes para determinar o coeficiente de correlação entre dois sensores.

Tabela 5.1: Coeficientes de correlação para o Teste 0.

Relação	Desempenho	Sensores	Valor [1174, 35]
Bandas sobrepostas	1 ^o	AC2z - AE8	0,925
Bandas sobrepostas	2 ^o	AC3 - AE8	0,918
Mesmo tipo de sensor	3 ^o	AC2z - AC3	0,915
Bandas não sobrepostas	4 ^o	AC2z - AE4	0,158
Bandas não sobrepostas	5 ^o	AC3 - AE4	0,069
Mesmo tipo de sensor	6 ^o	AE4 - AE8	0,061

Tabela 5.2: Coeficientes de correlação para o Teste 6.

Relação	Desempenho	Sensores	Valor [1175, 35]
Mesmo tipo de sensor	1 ^o	AC2z - AC3	0,699
Bandas sobrepostas	2 ^o	AC3 - AE8	0,637
Bandas sobrepostas	3 ^o	AC2z - AE8	0,586
Bandas não sobrepostas	4 ^o	AC3 - AE4	0,567
Bandas não sobrepostas	5 ^o	AC2z - AE4	0,553
Mesmo tipo de sensor	6 ^o	AE4 - AE8	0,429

Para uma correta interpretação os resultados das tabelas 5.1 e 5.2 temos de recorrer à tabela apresentada em [46] com os valores críticos de correlação para diferentes graus de significância e diferentes graus de liberdade da amostra. Sabendo o número de graus de liberdade da amostra e escolhendo um nível de significância obtemos através da tabela o valor crítico para existir correlação entre duas variáveis. Os valores dos coeficientes de correlação apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2 foram determinados para um grau de significância de 0,05. Para este grau de significância e para uma amostra com 5000 graus de liberdade temos que o valor crítico para a tabela correlação de Pearson ([46]) é 0,027714. No entanto, ao calcular o coeficiente de correlação entre sinais com as seguintes dimensões, 1174×35 , o que significa que o número de graus de liberdade é muito superior ao valor

máximo (5000) de graus de liberdade presentes na tabela dos valores críticos. Como para um grau de significância fixo, o valor crítico de correlação varia inversamente com o número de graus de liberdade, isto significa que no contexto do projeto o valor crítico de correlação é inferior ao valor 0,027714. Como todos os coeficientes de correlação determinados são superiores ao valor crítico rejeitamos a hipótese nula (coeficiente de correlação entre dois sinais ser zero). Assim, conclui-se que os sinais medidos por acelerómetros e sensores de emissão acústica estão correlacionados e por isso existe dependência entre os dois sinais.

Da observação destas tabelas verificamos que a correlação dos sinais dos acelerómetros (AC2z e AC3) é melhor com o sensor de emissão acústica AE8 do que com o AE4. Além disso, constatamos que o sensor AE4 também tem uma correlação muito baixa com o sensor de emissão acústica AE8 apesar de medirem a mesma propriedade física e de terem larguras de banda sobrepostas. Desta correlação podemos supor que o sensor AE8 comporta-se melhor como "acelerómetro" do que como sensor de emissão acústica. Os resultados obtidos validam o que era previsto antes de se realizarem os testes já que a selecção de um sensor de emissão acústica com largura de banda sobreposta à gama de frequências dos acelerómetros (AE8) implica que os resultados da correlação entre estes sensores sejam melhores do que entre os acelerómetros e o sensor de emissão acústica AE4, que tem uma resposta numa gama de frequências mais elevada. Deste modo, podemos concluir que entre os sensores utilizados neste projeto o sensor de emissão acústica AE4 é o que apresenta piores resultados.

Posteriormente, normalizaram-se as amplitudes das frequências dos anéis externo e interno do rolamento com a amplitude da frequência do eixo de rotação do sistema. A representação destes rácios serve para perceber se as variações observadas nos sinais das frequências de falha dos anéis são ou não influenciadas pela intensidade da frequência do eixo de rotação do sistema. Na figura 5.4 estão representados os rácios entre as amplitudes das frequências dos anéis e da frequência do eixo de rotação para o acelerómetro AC3 e o sensor de emissão acústica AE8 na situação do Teste de 6000 RPM. Apenas são apresentados os resultados destes dois sensores face ao melhor desempenho que tiveram na deteção da falha do rolamento comparativamente aos outros sensores utilizados. Da visualização destes gráficos verificamos que para a frequência de falha do anel externo do rolamento não se observam padrões que sugiram a degradação desta estrutura. Contrariamente, nos gráficos da frequência de falha do anel interno é possível observar um aumento no sinal normalizado que sugere a degradação do rolamento neste anel. Por estarmos a analisar apenas sinais de dois sensores de um único ensaio destrutivo de longa duração não podemos generalizar os resultados observados nesta situação. Ainda assim, o facto de conseguirmos determinar a localização da falha através de sinais normalizados pela amplitude da frequência do eixo de rotação é importante para a robustez dos resultados da deteção da localização das falhas do rolamento. Espera-se que em ambientes hostis, onde as condições de vibração e de ruído elétrico são muito elevadas, seja possível tal como na situação apresentada retirar ilações sobre o modo de funcionamento dos rolamentos sem

sermos influenciados pelas condições deste tipo de ambientes.

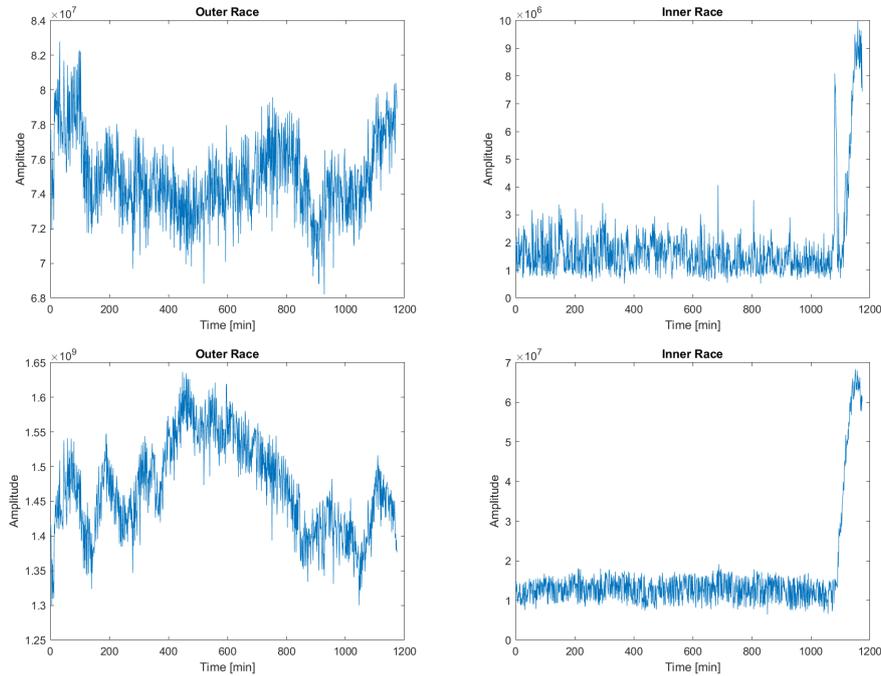


Figura 5.4: Representações gráficas do rácio entre as amplitudes das frequências do anel (esquerda) e interno (direita) e a amplitude da frequência do eixo de rotação. Na linha de cima encontram-se os rácios para os sinais detetados com o acelerómetro AC3 e na linha inferior os detetados com o sensor de emissão acústica AE8.

5.3 Validação do algoritmo

Após detetarmos padrões que indicam a degradação do rolamento e de concluirmos em que posição esta se encontra, foi necessário detetarmos o instante temporal para o qual a degradação se inicia de forma a determinarmos a restante vida útil do rolamento. Inicialmente, estes instantes foram determinados visualmente, ou seja, considerou-se que o instante em que a degradação do rolamento começava correspondia a uma transição evidente. Apesar deste método depender da subjetividade e da capacidade de interpretação de sinais por parte do observador, numa primeira fase foi útil para obtermos valores de referência. No entanto para uma validação mais fiável do instante de deteção da degradação do rolamento considerou-se uma abordagem alternativa que depende apenas de parâmetros do sinal como a média e o desvio-padrão. Desta forma, para que o processo de validação para os vários CIs considerados e os diferentes sensores utilizados fosse otimizado desenvolvi duas funções em Matlab que são apresentadas em apêndice.

A primeira função (ver o apêndice A.3) devolve uma matriz que indica em cada posição o número de pontos consecutivos que não pertencem ao intervalo $[\mu - M\sigma, \mu + M\sigma]$, onde μ e σ representam, respetivamente, o valor médio e desvio-padrão de uma amostra do sinal. Para a definição do intervalo foram considerados M desvios-padrão, onde 3 foi

o menor valor utilizado correspondendo a um grau de confiança de 0,997. Nesta matriz cada linha corresponde a um minuto de aquisição do teste enquanto as colunas referem-se aos CIs aplicados. Os *inputs* desta função são: uma matriz com os dados de diferentes CIs; o tempo de duração do teste; número de desvios-padrão considerados para definir o intervalo de confiança. Para calcular o valor de μ e σ o número de pontos utilizados corresponde a metade do tempo de duração de cada teste. Assim, são considerados os primeiros 587 pontos em cada um dos sinais quer para o Teste 0 quer para o Teste 6 pois apesar do último teste ter uma duração de 1669 minutos apenas 1175 desses minutos foram realizados com uma velocidade de 12000 RPM. Porém, para o Teste 6 foi ainda considerado outro intervalo de duração (desde 495 min até 750 min) pois para alguns sinais verifica-se que a variação significativa ocorre entre os 800 e os 900 minutos.

A segunda função desenvolvida tem como objetivo devolver uma matriz com todos os instantes de tempo para os quais se verifica que o valor do sinal corresponde ao 10^o ponto consecutivo que está fora do intervalo $[\mu - M\sigma, \mu + M\sigma]$. Se esta condição não se verificar para um determinado CI ou sensor, a posição correspondente da matriz indica termo em falta ("*missing*"). Assim, sabendo que este projeto tem como requisito fundamental a validação da deteção com um grau de confiança de 0,997, determina-se que para o Teste 0 se consegue detetar a falha com uma antecedência de 114 minutos já que o instante 1060 minutos é o instante mais cedo para o qual se verifica a condição, 10^o ponto consecutivo fora do intervalo $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$. Para o Teste 6 as funções implementadas determinam que a falha verificada no rolamento é detetada com 843 minutos de antecedência.

A equação L_{10} é a expressão mais utilizada para determinar com 90% de confiança a vida útil de um rolamento sob uma determinada carga e velocidade. A expressão que permite determinar a duração do rolamento em horas é apresentada na equação 5.2,

$$L_{10} (h) = \left(\frac{C}{P} \right)^n \frac{10^6}{60 v_r} \quad (5.2)$$

onde C, P, n e v_r são a capacidade de carga dinâmica (carga para a qual a vida útil do anel interior do rolamento é um milhão de rotações), a carga aplicada no rolamento, o expoente da expressão e a velocidade de rotação do eixo em RPM, respetivamente. Para situações em que os rolamentos utilizados são rolamentos de esferas o expoente da expressão anterior é $n = 3$ enquanto para rolamentos constituídos por elementos rolantes do tipo rolos cilíndricos temos $n = 10/3$. Apesar dos especialistas em testes de degradação afirmarem que a equação do L_{10} não é a melhor solução para converter os tempos dos ensaios destrutivos em tempos nominais de operação, recorreu-se a esta equação já que não foram encontradas outras alternativas para o efeito pretendido. Para este projeto a Thales definiu que as cargas nominais aplicadas seriam 13.8 kg para a direção radial enquanto na axial teríamos uma carga entre 0 e 258 N após uma pré-carga de 676 N. Deste modo, definiram-se 3 situações para a carga axial nominal aplicada: carga mínima;

carga máxima; carga intermédia como é apresentado na tabela 5.3. Através destes valores e das cargas aplicadas em cada um dos testes é possível fazer a conversão entre os dois instantes temporais através da equação 5.3, considerando que as velocidades de rotação são as verificadas para os dois testes analisados.

$$L_{10}^{Nominal} (h) = \left(\frac{P^{Teste}}{P^{Nominal}} \right)^3 L_{10}^{Teste} (h) \quad (5.3)$$

Tabela 5.3: Valores de carga nominais aplicadas e respetiva carga equivalente.

	F_a [N]	F_r [N]	P [N]
Carga mínima	676		689,40
Carga intermédia	805	135,24	816,28
Carga máxima	934		943,74

Na tabela 5.4 são apresentados os tempos de previsão do início da falha do rolamento para os testes 0 e 6 assim como os respetivos tempos de conversão para a situação de operação nominal. Para a condição de operação nominal são apresentados três valores distintos em cada um dos testes, referentes às três situações de carga nominal consideradas: mínima; intermédia; máxima. Nesta tabela são também apresentados entre parênteses os valores de duração da vida útil do rolamento para cada uma das situações de carga aplicadas de modo a contextualizar os resultados obtidos para previsão de falhas em rolamentos.

Tabela 5.4: Tempos de previsão de teste e nominais do início da falha do rolamento nos Testes de 0 e 6 para as diferentes situações de carga.

Teste [min]		Nominal [h]	
Teste 0	Teste 6	Teste 0	Teste 6
		Carga mínima	3252 (33487) 17240 (34132)
114 (1174)	843 (1669)	Carga intermédia	1959 (20173) 10385 (20561)
		Carga máxima	1268 (13053) 6720 (13305)

Como se comprova pela observação da tabela 5.4, através do algoritmo desenvolvido neste trabalho obtiveram-se, para as três situações nominais de carga aplicada no rolamento, tempos de previsão de falha que são no mínimo uma ordem de grandeza superiores ao valor imposto pelo líder do projeto (Thales), antecedência de 100 horas de voo na previsão da falha. Embora a Thales não concorda com a validade da equação L_{10} para a conversão de tempos de teste em tempos nominais, são inegáveis as diferenças consideráveis entre os tempos de conversão determinados face ao requisito fundamental do projeto. Estas diferenças deixam-nos confiantes sobre os resultados já que apesar das incertezas associadas à equação L_{10} temos uma margem de segurança notável para fazer previsão de falhas em rolamentos. Face aos resultados positivos obtidos com o algoritmo

5.3. Validação do algoritmo

desenvolvido neste trabalho considero válida a conclusão de o algoritmo ser capaz de fazer a previsão de falhas em rolamentos cumprindo as exigências do projeto: 3σ de grau de confiança e uma antecedência de pelo menos 100 horas de voo.

Capítulo 6

Conclusão

Como em qualquer projeto de engenharia, terminado este projeto é fundamental refletir sobre o trabalho desenvolvido e retirar desta dissertação todo o seu valor. Esta dissertação enquadra-se numa fase intermédia de um projeto que após uma fase inicial de desenvolvimento será continuado. Por isso é importante ter em conta os objetivos que este trabalho se propôs a cumprir nesta fase do projeto.

O trabalho apresentado nesta dissertação incidiu sobre o desenvolvimento de um algoritmo para *condition monitoring* com aplicação em previsão de falhas em rolamentos da próxima geração de geradores e acionadores de partida utilizados em aeronaves. O algoritmo considera dois domínios de sinal distintos e complementares, domínios temporal e das frequências, e ainda um grupo restrito de CIs. Através de uma apreciação global podemos afirmar que o trabalho desenvolvido foi bem sucedido pois os requisitos fundamentais propostos inicialmente são cumpridos.

Com o objetivo de detetar as falhas mecânicas introduzidas nos rolamentos testados no equipamento de teste produzido pelo consórcio, foram analisados os sinais de três tipos de sensores: temperatura; vibração; emissão acústica. Cada grupo de medição é composto por dois sensores de modo a correlacionar os sinais adquiridos. Relativamente à vibração sentida pelo rolamento, esta é medida nas três direções (radial, tangencial e axial), sendo que na direção radial (componente z) são adquiridos dois sinais, um proveniente do acelerómetro triaxial (AC2) e outro originado pelo uniaxial (AC3).

Da análise destes sinais no domínio do tempo é possível detetar a degradação dos rolamentos. Estas falhas, tal como era esperado teoricamente, são visíveis para os sinais de vibração e emissão acústica e numa fase posterior também se detectam nos sinais de temperatura.

Com a análise de sinal no domínio das frequências corroboram-se numa primeira fase os resultados obtidos anteriormente para o domínio temporal. Além disto, com a análise do espectro de frequências do sinal consegue-se determinar qual é a origem da falha presente

no rolamento, o que significa que com este algoritmo não só é possível prever a falha como também determinar a sua localização. Através deste domínio de análise o algoritmo determina que a falha encontra-se no anel interno dos rolamentos, sendo que o resultado mais notável é a capacidade da deteção ser independente do sinal da frequência de rotação do eixo do sistema. Esta independência é importante já que se observam tendências nos sinais das frequências naturais do rolamento apesar da vibração do eixo também variar com o tempo. Além disso, como para velocidades de rotação muito elevadas existe maior vibração do sistema e maior ruído elétrico, é fundamental diagnosticar o tipo de falha através de sinais normalizados para que as ilações retiradas não sejam influenciadas pelas variações presentes no sinal da frequência de rotação do eixo.

De todos os CIs utilizados durante este projeto tenho a destacar o valor eficaz (RMS), curtose, desvio padrão e fator de forma (*shape factor*, quociente entre o valor eficaz e o valor médio) pelos seus desempenhos em detetar a degradação da condição dos rolamentos. Estes CIs além de apresentarem padrões evidentes que indicam que o rolamento está danificado, também possibilitam prever a falha com uma antecedência maior do que a dos outros CIs implementados.

Por último, determinaram-se os tempos de previsão de falha quando o rolamento está em modo de operação nominal. Apesar do líder do projeto (Thales) não concordar com a utilização da equação L_{10} por considerarem que os resultados obtidos não são válidos, como não apresentaram outra alternativa para converter os tempos de previsão de teste em tempos nominais, utilizou-se esta equação para o efeito. Deste modo, é preciso ter algum cuidado quando analisamos e discutimos os resultados do tempo de previsão nominal. Face às situações de carga nominal aplicada ao rolamento, determinou-se que para a velocidade de rotação de 6000 RPM o tempo mínimo de previsão da falha é 1268 horas enquanto para a velocidade de 12000 RPM é possível prever a falha com uma antecedência de pelo menos 6720 horas de voo. Relembrando que o líder do projeto exige que a previsão de falhas seja assegurada com pelo menos 100 horas de voo, constatamos que os tempos nominais determinados são uma ordem de grandeza superiores ao valor exigido. Esta diferença entre os dois valores significa que temos uma margem de segurança importante para previsão de falhas em rolamentos, que abrange as incertezas da equação L_{10} . Face aos resultados obtidos, é aceitável afirmar que o algoritmo desenvolvido tem a capacidade de fazer a previsão de falhas em rolamentos, quer para o domínio temporal quer para o espaço das frequências, com um grau de significância de 0,997 (3σ) e uma antecedência de pelo menos 100 h de voo. Ao cumprir os requisitos fundamentais deste projeto, asseguramos a robustez do algoritmo e uma possível implementação no modo de operação nominal dos rolamentos.

6.1 Trabalho futuro

Num futuro próximo devem ser realizadas tarefas que aperfeiçoem quer o algoritmo desenvolvido neste trabalho quer o projeto iBearing produzido pelo consórcio.

Quanto ao projeto iBearing é importante desenvolver um equipamento de teste que possibilite a realização de ensaios destrutivos de longa duração para estudar a evolução da degradação dos rolamentos com velocidades de rotação próximas de 24000 e 29000 RPM. É fundamental o desenvolvimento de um novo equipamento porque o sistema utilizado durante o projeto apenas alcançou uma velocidade de rotação de 17200 RPM apesar do líder do projeto (Thales) pretender velocidades de 12000, 24000 e 29000 RPM. Estas velocidades simulam respetivamente as fases de taxiamento, cruzeiro e descolagem de um avião. A realização destes ensaios destrutivos permitirá retirar ilações elucidativas sobre o funcionamento do rolamento a estas velocidades durante a operação nominal. Por outro lado, nesta fase de validação e aperfeiçoamento do projeto é relevante que sejam utilizados equipamentos (sensores, rolamentos, cabos e conectores) que resistam às condições extremas de um ambiente hostil, o que significa que o sensor de emissão acústica AE8 utilizado deverá ter acoplado um revestimento resistente às temperaturas elevadas verificadas nestes ambientes.

Relativamente ao algoritmo desenvolvido, sugere-se para um futuro próximo a aplicação de Intelência Artificial (IA), como por exemplo as Redes Neurais Artificiais (ANN), para automatizar o processo de previsão de falhas e otimização dos resultados obtidos. Além disso, face aos resultados alcançados neste projeto, proponho que sejam utilizados apenas os sinais adquiridos pelo acelerómetro uniaxial (AC3) e pelo sensor de emissão acústica AE8. A necessidade de minimizar o número de sensores a implementar no sistema de deteção em aeronaves implica que além dos indispensáveis sensores de temperatura opte por estes dois sensores devido às seguintes características: pequenas dimensões; sobreposição da largura de banda; existência no mercado de sensores resistentes a condições ambientais adversas; ótimo desempenho na deteção da degradação do rolamento durante os testes realizados.

Por fim, concluo esta dissertação com a certeza que adquiri conhecimentos nas mais variadas áreas da Engenharia Física, durante os cinco anos de formação e especialmente neste último, que enriqueceram o meu percurso de estudante e estimularam o interesse, como futuro Engenheiro, de participar em desenvolvimento de projetos no setor automóvel ou aeronáutico.

Referências bibliográficas

- [1] Maximize Market Research. *Machine Condition Monitoring Market*. 2016. URL: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/machine-condition-monitoring-market/2485/#> (acedido em 30/04/2019).
- [2] I. Durazo-Cardenas et al. “Towards health monitoring of hybrid ceramic bearings in aircraft starter/generators”. Em: *Procedia Manufacturing* 19 (2018). Proceedings of the 6th International Conference in Through-life Engineering Services, University of Bremen, 7th and 8th November 2017, pp. 50 –57. ISSN: 2351-9789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.01.008>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300088>.
- [3] Pierre Tchakoua et al. “Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges”. Em: *Energies*. Vol. 7. 4. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2014, pp. 2595–2630. DOI: [10.3390/en7042595](https://doi.org/10.3390/en7042595). URL: <http://www.mdpi.com/1996-1073/7/4/2595>.
- [4] Active Space Technologies S.A.: URL: <https://www.activespacetech.com/>.
- [5] Robert Bond Randall. *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, United Kingdom, mar. de 2011. 309 pp. ISBN: 0470747854 ; 9780470747858. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=EFA568C4CFE5023A492A3480D3AEC29D>.
- [6] Alan Davies. *Management guide to condition monitoring in manufacture*. Manufacturing Series. The Institution of Production Engineers, London, UK, 1990. 98 pp. ISBN: 0-85510-037-0 ; 9780855100377. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=558b638f918c51cd7ffc8d46fdff26f6>.
- [7] Tonphong Kaewkongka. “Bearing condition monitoring using acoustic emission and vibration: The systems approach”. Tese de doutoramento. Department of Systems Engineering, Brunel University, Uxbridge, London, United Kingdom, 2002. 227 pp. URL: <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/7862>.
- [8] Aiwina Heng et al. “Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities”. Em: *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 23. 3. Elsevier, 2009, pp. 724 –739. DOI: [10.1016/j.ymsp.2008.06.009](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2008.06.009). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327008001489>.

- [9] R.J. Kuoppala, E.O. Jantunen e P.A. Enwald. “Condition monitoring methods for rotating machinery”. Em: *Operational Reliability and Systematic Maintenance*. Chapman & Hall/CRC, 1991, pp. 175–198. URL: <http://libgen.io/book/index.php?md5=F60BE992EF5BAA9E54A595FAD6952259>.
- [10] Christian Boller e Norbert Meyendorf. “State-of-the-Art in Structural Health Monitoring for Aeronautics”. Em: *Proceedings of the International Symposium on NDT in Aerospace, Fürth/Bavaria, Germany*. Dez. de 2008. URL: https://www.ndt.net/article/aero2008/aero08_boller.pdf.
- [11] *Aircraft Accident Investigation Report*. AA2009-7. Tóquio, Japão: Japan Transport Safety Board, 21 de ago. de 2009. 117 pp. URL: http://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-air_report/B18616.pdf (acedido em 08/07/2019).
- [12] Shukri Ali Abdusslam. “Detection and diagnosis of rolling element bearing faults using time encoded signal processing and recognition”. Tese de doutoramento. School of Computing e Engineering - University of Huddersfield, Huddersfield, West Yorkshire, England, 2012. 204 pp. URL: http://s.hud.ac.uk/id/eprint/17806/1/Final_Thesis_-_Feb_2013.pdf.
- [13] B. K. N. Rao (auth.) e A. Davies (ed.) *Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology*. 1^a ed. Springer Science % Business Media, Dordrecht, Netherlands, 1998. 571 pp. ISBN: 978-94-010-6065-3 ; 978-94-011-4924-2. DOI: [10.1007/978-94-011-4924-2](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4924-2). URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=42ad8a0d535c2afb263d166a1f069b67>.
- [14] Robert B. Randall e Jérôme Antoni. “Rolling element bearing diagnostics - A tutorial”. Em: *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 25. 2. Elsevier, 2011, pp. 485–520. DOI: [10.1016/j.ymsp.2010.07.017](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2010.07.017). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327010002530>.
- [15] V.M. Nistane e S.P. Harsha. “Prognosis of degradation progress of ball bearings using supervised machine learning”. Em: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. Vol. 232. 2. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2018, pp. 183–198. DOI: [10.1177/1464419317731046](https://doi.org/10.1177/1464419317731046). URL: <https://doi.org/10.1177/1464419317731046>.
- [16] S. Devendiran e K. Manivannan. “Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Components - A Review”. Em: *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. 11. 6. Research India Publications, abr. de 2016, pp. 3966–3975. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/5a20/aad1729afc6e4fdc5e399f364496c733bace.pdf>.
- [17] Richard A. Wade. “A Need-focused Approach to Air Force Engine Health Management Research”. Em: *2005 IEEE Aerospace Conference*. IEEE. Mar. de 2005, pp. 1–13. DOI: [10.1109/AERO.2005.1559641](https://doi.org/10.1109/AERO.2005.1559641). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1559641>.
- [18] Tian Ran Lin, Kun Yu e Jiwen Tan. “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Roller Element Bearing”. Em: *Bearing Technology*. Ed. por Pranav H. Darji. Rijeka:

- IntechOpen, 2017. Cap. 3. DOI: [10.5772/67143](https://doi.org/10.5772/67143). URL: <https://doi.org/10.5772/67143>.
- [19] Farzad Hemmati, Mohammad Miraskari e Mohamed S. Gadala. “Application of wavelet packet transform in roller bearing fault detection and life estimation”. Em: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1074. 1. IOP Publishing, Set. de 2018, p. 012142. DOI: [10.1088/1742-6596/1074/1/012142](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1074/1/012142). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1074/1/012142/pdf>.
- [20] Duy-Tang Hoang e Hee-Jun Kang. “Rolling element bearing fault diagnosis using convolutional neural network and vibration image”. Em: *Cognitive Systems Research*. Vol. 53. Advanced Intelligent Computing. Elsevier, 2019, pp. 42–50. DOI: [10.1016/j.cogsys.2018.03.002](https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.03.002). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389041717303261>.
- [21] R.K. Patel e V.K. Giri. “Condition monitoring of induction motor bearing based on bearing damage index”. Em: *Archives of Electrical Engineering*. Vol. 66. 1. De Gruyter Open, 2017, pp. 105–119. DOI: [10.1515/ae-2017-0008](https://doi.org/10.1515/ae-2017-0008). URL: <https://content.sciendo.com/view/journals/ae/66/1/article-p105.xml>.
- [22] Hüseyin Metin Ertunç. “A combined decision algorithm for diagnosing bearing faults using Artificial Intelligent Techniques”. Em: *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*. Vol. 36. 4. 2018, pp. 1235–1253.
- [23] Youngji Yoo e Jun-Geol Baek. “A Novel Image Feature for the Remaining Useful Lifetime Prediction of Bearings Based on Continuous Wavelet Transform and Convolutional Neural Network”. Em: *Applied Sciences*. Vol. 8. 7. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018, p. 1102. DOI: [10.3390/app8071102](https://doi.org/10.3390/app8071102). URL: <http://www.mdpi.com/2076-3417/8/7/1102>.
- [24] Lu Wang, Li Zhang e Xue-zhi Wang. “Reliability estimation and remaining useful lifetime prediction for bearing based on proportional hazard model”. Em: *Journal of Central South University*. Vol. 22. 12. Springer, dez. de 2015, pp. 4625–4633. DOI: [10.1007/s11771-015-3013-9](https://doi.org/10.1007/s11771-015-3013-9). URL: <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3013-9>.
- [25] Aisong Qin et al. “Remaining Useful Life Prediction for Rotating Machinery Based on Optimal Degradation Indicator”. Em: *Shock and Vibration*. Vol. 2017. Hindawi, mar. de 2017, pp. 1–12. DOI: [10.1155/2017/6754968](https://doi.org/10.1155/2017/6754968). URL: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2017/6754968/>.
- [26] Rodrick K. Draney. “High Temperature Sensor for Bearing Health Monitoring”. Em: *2008 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, Mar. de 2008, pp. 1–7. DOI: [10.1109/AERO.2008.4526602](https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526602). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4526602>.
- [27] Andrew Kovacs, Dimitrios Peroulis e Farshid Sadeghi. “Early-Warning Wireless Telemeter for Harsh-Environment Bearings”. Em: *SENSORS, 2007 IEEE*. IEEE, out. de 2007, pp. 946–949. DOI: [10.1109/ICSENS.2007.4388559](https://doi.org/10.1109/ICSENS.2007.4388559). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4388559>.

- [28] Jason Stack. “Bearing Fault Signature Detection”. Pat. US 7421349 (B1). Set. de 2008. URL: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=7421349B1&KC=B1&FT=D&ND=3&date=20080902&DB=EPODOC&locale=en_EP.
- [29] John Judd. “Rotating bearing analysis and monitoring system”. Pat. US 2009093975 (A1). Abr. de 2009. URL: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=2009093975A1&KC=A1&FT=D&ND=3&date=20090409&DB=EPODOC&locale=en_EP.
- [30] Zhang Bao. “Rolling bearing fault diagnosis method”. Pat. CN 106404396 (A). Fev. de 2017. URL: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20170215&CC=CN&NR=106404396A&KC=A.
- [31] Hu Wenyang e Hu Wenxuan. “Method for detecting early fault of bearing through secondary phase coupling and improved bi-spectrum algorithm”. Pat. CN 108120598 (A). Jun. de 2018. URL: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20180605&CC=CN&NR=108120598A&KC=A.
- [32] Gefei Bu e Lei Guo. “Bearing residual life monitoring method and monitoring device”. Pat. CN107843426 (A). Mar. de 2018. URL: https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=CN&NR=107843426A&KC=A&FT=D&ND=3&date=20180327&DB=EPODOC&locale=en_EP.
- [33] Archana Nair e C.S. Cai. “Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies”. Em: *Engineering Structures*. Vol. 32. 6. Elsevier, 2010, pp. 1704–1714. DOI: [10.1016/j.engstruct.2010.02.020](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.020). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029610000623>.
- [34] Innovative Sensor Technology USA Division. *Resistance Temperature Detector (RTD) - Principle of Operation, Materials, Configuration and Benefits*. AZoM. Fev. de 2019. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5573> (acedido em 02/07/2019).
- [35] António Mota, Rui Sousa e António Santos. *iBearing - Instrumented Bearing for Oil Cooled Starter/Generator*. Technical report. Active Space Technologies. Parque Industrial de Taveiro, Lote 12, 3045-508 Coimbra, Portugal, 30 de jun. de 2018. 97 pp.
- [36] Deepam Goyal et al. “Condition Monitoring Parameters for Fault Diagnosis of Fixed Axis Gearbox: A Review”. Em: *Archives of Computational Methods in Engineering*. Vol. 24. 3. Springer, jul. de 2017, pp. 543–556. DOI: [10.1007/s11831-016-9176-1](https://doi.org/10.1007/s11831-016-9176-1). URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9176-1>.
- [37] Junda Zhu et al. “Survey of condition indicators for condition monitoring systems”. Em: *PHM 2014 - Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2014*. Vol. 5. Jan. de 2014, pp. 635–647. URL: <https://www>.

- phmsociety.org/sites/phmsociety.org/files/phm_submission/2014/phmc_14_065.pdf.
- [38] David Ruppert. “What is Kurtosis? An Influence Function Approach”. Em: *The American Statistician*. Vol. 41. 1. Taylor & Francis, 1987, pp. 1–5. DOI: [10.1080/00031305.1987.10475431](https://doi.org/10.1080/00031305.1987.10475431). eprint: <https://doi.org/10.1080/00031305.1987.10475431>. URL: <https://doi.org/10.1080/00031305.1987.10475431>.
- [39] Peter H. Westfall. “Kurtosis as Peakedness, 1905–2014. R.I.P.” Em: *The American Statistician* 68.3 (2014), pp. 191–195. DOI: [10.1080/00031305.2014.917055](https://doi.org/10.1080/00031305.2014.917055). eprint: <https://doi.org/10.1080/00031305.2014.917055>. URL: <https://doi.org/10.1080/00031305.2014.917055>.
- [40] P. Večeř, Marcel Kreidl e Radislav Šmíd. “Condition Indicators for Gearbox Condition Monitoring Systems”. Em: *Acta Polytechnica*. Vol. 45. 6. Czech Technical University, Prague, Czech Republic, jun. de 2005, pp. 35–43. URL: https://www.researchgate.net/publication/200706575_Condition_Indicators_for_Gearbox_Condition_Monitoring_Systems.
- [41] James W. Cooley e John W. Tukey. “An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series”. Em: *Mathematics of computation*. Vol. 19. 90. American Mathematical Society, abr. de 1965, pp. 297–301. DOI: [10.2307/2003354](https://doi.org/10.2307/2003354). URL: <http://www.jstor.org/stable/2003354?origin=JSTOR-pdf>.
- [42] H. Saruhan et al. “Vibration Analysis of Rolling Element Bearings Defects”. Em: *Journal of Applied Research and Technology*. Vol. 12. 3. UNAM, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, 2014, pp. 384–395. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)71620-7](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)71620-7). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642314716207>.
- [43] Ciprian Harlisca e Loránd Szabó. “Bearing faults condition monitoring-a literature survey”. Em: *Journal of Computer Science and Control Systems*. Vol. 5. 2. University of Oradea, jan. de 2012, pp. 19–22. URL: <https://www.researchgate.net/publication/260037824>.
- [44] Hamid A. Toliyat et al. *Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis*. CRC Press (Taylor & Francis Group), Boca Raton, Florida, USA, 2013. 266 pp. ISBN: 0849370272, 9780849370274. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=3054d5917b00228dd70ef53662b4fb8b>.
- [45] Nannan Zhang et al. “Bearing Remaining Useful Life Prediction Based on Naive Bayes and Weibull Distributions”. Em: *Entropy* 20.12 (dez. de 2018), pp. 944–962. ISSN: 1099-4300. DOI: [10.3390/e20120944](https://doi.org/10.3390/e20120944). URL: <https://www.mdpi.com/1099-4300/20/12/944>.
- [46] Charles Zaiontz. *Pearson’s Correlation Table*. URL: <http://www.real-statistics.com/statistics-tables/pearsons-correlation-table/> (accedido em 06/09/2019).

Apêndices

Apêndice A

Códigos Matlab

A.1 Condition Indicators

```
1 function CIs = ConditionIndicators(data)
2     variance = moment(data,2);
3
4     CIs(1,1) = max(data);
5     CIs(1,2) = min(data);
6     CIs(1,3) = mean(data);
7     CIs(1,4) = std(data);
8     CIs(1,5) = rms(data);
9     CIs(1,6) = peak2peak(data);
10    CIs(1,7) = skewness(data);
11    CIs(1,8) = kurtosis(data);
12    CIs(1,9) = crestfactor(data);
13    CIs(1,10) = marginfactor(data);
14    CIs(1,11) = shapefactor(data);
15    CIs(1,12) = impulsefactor(data);
16    CIs(1,13) = EnergyOperator(data);
17    CIs(1,14) = FM4(data);
18    CIs(1,15) = M6A(data);
19    CIs(1,16) = M8A(data);
20    CIs(1,17) = moment(data,1);
21    CIs(1,18) = variance;
22    CIs(1,19) = moment(data,3);
23    CIs(1,20) = moment(data,4);
24    CIs(1,21) = moment(data,5);
25    CIs(1,22) = moment(data,6);
26    CIs(1,23) = moment(data,7);
27    CIs(1,24) = moment(data,8);
28    CIs(1,25) = moment(data,9);
29    CIs(1,26) = moment(data,10);
30    CIs(1,27) = moment(data,1) ./ (variance.^(1/2));
31    CIs(1,28) = moment(data,2) ./ (variance.^(2/2));
32    CIs(1,29) = moment(data,3) ./ (variance.^(3/2));
```

```

33     CIs(1,30) = moment(data,4) ./ (variance.^(4/2));
34     CIs(1,31) = moment(data,5) ./ (variance.^(5/2));
35     CIs(1,32) = moment(data,6) ./ (variance.^(6/2));
36     CIs(1,33) = moment(data,7) ./ (variance.^(7/2));
37     CIs(1,34) = moment(data,8) ./ (variance.^(8/2));
38     CIs(1,35) = moment(data,9) ./ (variance.^(9/2));
39     CIs(1,36) = moment(data,10) ./ (variance.^(10/2));
40     CIs(1,37) = wentropy(data, 'shannon');
41 end
42
43 function yout = crestfactor(data)
44     yout = peak2peak(data) ./ rms(data);
45 end
46 function yout = marginfactor(data)
47     yout = max(abs(data)) ./ ((1/length(data)) * (sum(sqrt(data))^2));
48 end
49 function yout = shapefactor(data)
50     yout = rms(data) ./ mean(abs(data));
51 end
52 function yout = impulsefactor(data)
53     yout = max(abs(data)) ./ mean(abs(data));
54 end
55 function yout = EnergyOperator(data)
56     deltaX = (data(2:end,1)).^2 - (data(1:(end-1),1)).^2;
57     x0 = deltaX - mean(deltaX); s2 = x0.^2; N = length(x0);
58     yout = (N^2) * ( sum(x0.^4) ./ (sum(s2)^2) );
59 end
60 function yout = FM4(data)
61     x0 = diff(data) - mean(diff(data)); s2 = x0.^2; N = length(x0);
62     yout = N * (sum(x0.^4) ./ (sum(s2)^2) );
63 end
64 function yout = M6A(data)
65     x0 = diff(data) - mean(diff(data)); s2 = x0.^2; N = length(x0);
66     yout = (N^2) * ( sum(x0.^6) ./ (sum(s2)^3) );
67 end
68 function yout = M8A(data)
69     x0 = diff(data) - mean(diff(data)); s2 = x0.^2; N = length(x0);
70     yout = (N^2) * ( sum(x0.^8) ./ (sum(s2)^4) );
71 end

```

A.2 Frequências naturais do rolamento

```

1 function [val1, val2, val3, val4] = faultfrequencies(data, t, freq, bw, string)
2 idx1 = round(freq - bw); %limite inferior do intervalo de frequencias
3 idx2 = round(freq + bw); %limite superior do intervalo de frequencias
4 if strcmp(string, 'findpeaks')
5     [Pks, POS] = findpeaks(data(idx1:idx2), t(idx1:idx2), 'SortStr', 'descend');
6     val1 = Pks(1,1); %amplitude do pico
7     val2 = POS(1,1); %posicao (frequencia) do pico

```

```

8
9     vec = ( ((POS(1,1) + 1) - bw) : ((POS(1,1) + 1) + bw)); %vetor auxiliar
10 elseif strcmp(string, 'max')
11     [MAX,LOC] = max(data((t >= idx1) & (t <= idx2)));
12     val1 = MAX; %amplitude do pico
13     val2 = t(LOC + idx1,1); %posicao (frequencia) do pico
14
15     vec = (t(LOC + idx1,1) - bw : t(LOC + idx1,1) + bw); %vetor auxiliar
16 end
17 val3 = val2 - round(freq); %diferenca entre a frequencia teorica e a
    determinada
18 val4 = sum(data(vec,1) .* t(vec,1)) / sum(data(vec,1)); %frequencia media
19 end

```

A.3 Validação da detecção/previsão da falha

```

1 function vec = fault_prediction_validation(data, testDurationTime, nStDs)
2 %nStDs representa o numero de desvios padrao considerado para definir a
    largura do intervalo em torno da media
3
4 if testDurationTime == 1174
5     idx1 = 1; idx2 = testDurationTime/2;
6 elseif testDurationTime == 1669
7     idx1 = 495; Signalsize = round(length(idx1:testDurationTime)/2) - 1;
8     idx2 = idx1+Signalsize; %Hipotese 1: intervalo [495 - 1082] min
9 %     idx1 = 495; idx2 = 750; %Hipotese 2: intervalo [495 - 750] min
10 elseif testDurationTime==4207
11     idx1=1; idx2 = (testDurationTime-idx1)/2;
12 end
13 total_cis = size(data,2);
14 vec = zeros(testDurationTime, total_cis);
15 for ci=1:1:total_cis
16     count=0; mu = mean(data(idx1:idx2, ci)); sigma = std(data(idx1:idx2, ci));
17     for n=(idx2+1):1:testDurationTime
18         if (data(n, ci) < (mu-nStDs*sigma) || data(n, ci) > (mu+nStDs*sigma))
19             count = count+1;
20         else
21             count = 0;
22         end
23         vec(n, ci) = count;
24     end
25 end
26 end

```