



Análise e desenvolvimento do processo de sensorização de Tornos CNC para Manutenção Preditiva

SANDRA CATARINA DA SILVA COSTA

julho de 2019

ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SENSORIZAÇÃO DE TORNOS CNC PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA

Sandra Catarina da Silva Costa
1141218

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SENSORIZAÇÃO DE TORNOS CNC PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA

Sandra Catarina da Silva Costa
1141218

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Francisco José Gomes da Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos

Professor Adjunto, Departamento de Matemática, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor António Bastos Pereira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

AGRADECIMENTOS

Quero primeiro agradecer aos meus pais por todo o apoio prestado, compreensão e amor que me deram ao longo da minha vida académica, profissional e pessoal. À minha avó e ao meu padrinho por estarem sempre do meu lado e aos meus amigos por todas as vezes que me apoiaram e deram força nesta caminhada.

Quero agradecer também ao meu orientador, o Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva por todo o apoio prestado e orientação nesta dissertação. Aos restantes engenheiros do Instituto Superior de Engenharia do Porto por todos os conhecimentos que me transmitiram ao longo destes cinco anos em que fiz parte desta Instituição.

Por último, à empresa Sá Couto e Monteiro, S.A. e a todos os seus colaboradores por toda a simpatia e auxílio prestados ao longo do estágio.

PALAVRAS CHAVE

Controlo Numérico Computorizado, Manutenção baseada na condição, Sensorização, Rolamentos, Vibração, Emissões acústicas, Sensores, Processador de sinais, Tornos CNC.

RESUMO

Com a crescente competitividade da Indústria, as organizações procuram que os equipamentos tenham maior produtividade e disponibilidade, que os produtos tenham qualidade, e que para tal se utilizem os menores recursos possíveis. Deste modo, a manutenção assume um papel importante para manter o equipamento no seu desempenho máximo. Com a evolução tecnológica, surgiu a manutenção baseada na condição (*Condition-based maintenance* - CBM), responsável por detetar os defeitos e prever as falhas que surgirão e em que momento. No caso das máquinas de controlo numérico computadorizado (*Computer Numeric Control* - CNC), esta técnica pode ser eficazmente aplicada aos seus rolamentos no fuso, que são dos componentes mais críticos, pois a sua falha torna a máquina indisponível. Assim sendo, a possibilidade de detetar o surgimento de defeitos nos rolamentos recorrendo à CBM é uma mais valia para uma organização.

Esta dissertação apresenta uma proposta de implementação de um sistema de CBM com recurso a monitorização da vibração e emissões acústicas dos rolamentos de um torno suíço na empresa Sá Couto e Monteiro, S.A. Este sistema recorre a sensores e um processador de sinais, que depois enviará os dados recolhidos para um computador com um *software* especializado e personalizável, que despoletará os alertas de acordo com limites de referência das duas medições e consoante o tipo de atividade de manutenção necessária, enviando uma mensagem ao responsável de manutenção. Este sistema tem como objetivo a automatização da função de manutenção, tornando-a mais eficaz.

KEYWORDS

Computer Numeric Control, Condition-Based Maintenance, Sensorization, Bearings, Vibration, Acoustic Emissions, Sensors, Signal Processor, CNC Lathe.

ABSTRACT

With the increasing competitiveness of the Industry, the organizations try to make the equipment more productive and available, with quality products, and with the minimum possible resources are used. In this way, maintenance plays an important role in keeping the equipment at its maximum performance. With the evolution of technology, condition-based maintenance (CBM) emerged, being responsible for detecting the defects and predicting the failures that will arise and at what time. In the case of computerized numeric control (CNC) machines, this technique can be effectively applied to the bearings of the spindle, since they are the most critical components because their failure makes the machine unavailable. Thus, the possibility of detecting the occurrence of defects in bearings using CBM is an added value for an organization.

This dissertation presents a proposal for the implementation of a CBM system with the use of vibration monitoring and acoustic emissions of bearings of a Swiss lathe in the company Sá Couto e Monteiro, SA. This system uses sensors and a signal processor that will send the data collected to a computer with a specialized and customizable software that will trigger the alerts according to the reference limits of the two measurements and depending on the type of maintenance activity required, a message to the maintenance manager can be sent. This system aims to automatize the maintenance function, making it more effective.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Sistema americano para a classificação dos aços)
ANN	<i>Artificial neural network</i> (Redes neurais artificiais)
ARIS	Arquitetura de Sistemas Integrados de Informação
Arms	Valor da raiz quadrática média da aceleração
ASI	Arquitetura de Sistemas de Informação
BPFI	<i>Ball Pass Frequency of Inner ring</i> (Defeito de rolamento na pista interna)
BPFO	<i>Ball Pass Frequency of Outer ring</i> (Defeito de rolamento na pista externa)
BSF	<i>Ball Spin Frequency</i> (Defeito de rolamento na esfera)
CBM	<i>Condition based maintenance</i> (Manutenção baseada na condição)
CNC	Controlo numérico computadorizado
CPS	<i>Cyber physical systems</i> (Sistemas ciber físicos)
D	Diâmetro das esferas do rolamento
D	Diâmetro médio do rolamento
DA	<i>Data Access</i>
DCCP	<i>Datagram Congestion Control Protocol</i> (Protocolo de controle de congestionamento de datagrama)
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i> (Protocolo de configuração dinâmica de endereços de rede)
Di	Disponibilidade
EA	Emissões Acústicas
EN	<i>European normalization</i> (Norma europeia)
FC	Fator de crista
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada rápida de Fourier)
FIFO	<i>First in, first out</i>
FTF	<i>Fundamental Train Frequency</i> (Defeito de rolamento na gaiola)
I	Número da amostra
IA	Inteligência Artificial

ICP	<i>Integrated Circuit Piezoelectric</i>
IEPE	<i>Integrated Electronics Piezo-Electric</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things (Internet das coisas Industrial)</i>
IoT	<i>Internet of Things (Internet das coisas)</i>
IP	<i>Internet Protocol (Protocolo de Internet)</i>
IPxx	Índice de Proteção
ISSO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIT	<i>Just-in-time</i>
K	Curtose
L	Largura
LTSC	<i>Long term spindle condition (Condição do fuso a longo prazo)</i>
M	Rosca Métrica
MEMS	<i>Microelectromechanical systems (Sistemas mico eletromecânicos)</i>
MP	Manutenção preventiva
MTBF	<i>Mean time between failure (Tempo médio entre falhas)</i>
MTTF	<i>Mean time to failure (Tempo médio até à falha)</i>
MTRR	<i>Mean time to repair (Tempo médio de reparação)</i>
N	Número total de pontos da amostra
Nf	Número de esferas
NP	Norma portuguesa
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness (Eficiência global do equipamento)</i>
OPC	<i>Open Platform Communications</i>
P	Performance/Desempenho
PMEs	Pequenas e médias empresas
Q	Qualidade
RCA	<i>Root cause analysis (Análise da causa raiz)</i>
RMS	<i>Root mean square (Raiz quadrática média)</i>
RUL	<i>Remaining useful life (Vida útil restante)</i>
S.A.	Sociedade Anónima
SCTP	<i>Stream Control Transmission Protocol (Protocolo de transmissão de controle de fluxo)</i>
SI	Sistemas de Informação
SS	<i>Swedish Standard (Norma Sueca)</i>
STSC	<i>Short term spindle condition (Condição do fuso a curto prazo)</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol (Protocolo de Controle de Transmissão)</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance (Manutenção Produtiva Total)</i>
TQM	<i>Total Quality Management (Gestão da qualidade total)</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol (Protocolo de datagrama de utilizador)</i>
Vrms	Valor da velocidade para a raiz quadrática média
W	Rotação do veio

X_i	Valor do sinal num dado ponto i da amostra
-------	--

Lista de Unidades

G	Gramma
---	--------

G	Aceleração da gravidade
---	-------------------------

Gb	Gigabit
----	---------

Hz	Hertz
----	-------

kN	Kilonewton
----	------------

kW	Kilowatt
----	----------

Mb	Megabit
----	---------

MHz	Megahertz
-----	-----------

Rad	Radiano
-----	---------

Rpm	rotações por minuto
-----	---------------------

S	Segundo
---	---------

V	Volts
---	-------

°C	Graus celsius
----	---------------

μm	Micrómetro
---------------	------------

Lista de Símbolos

®	Marca registada
---	-----------------

σ	Desvio-padrão
----------	---------------

μ	Média
-------	-------

α	Ângulo de contacto
----------	--------------------

€	Euros
---	-------

\emptyset	Diâmetro
-------------	----------

%	Percentagem
---	-------------

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Benchmarking</i>	Processo de aprendizagem e melhoria de uma área organizacional, através da observação das melhores práticas.
Cartas de Controlo	Gráfico que representa um processo através de amostras ao longo do tempo, e onde estão representados os limites superior e inferior de controle, e também o limite central, ou seja, a linha média do processo.
Diagrama de Ishikawa	Gráfico que representa as possíveis causas de um determinado problema. É também muitas vezes designado de Diagrama de Causa e Efeito ou Diagrama Espinha de Peixe devido ao seu formato.
Diagrama de Pareto	Gráfico de colunas que representa as frequências de determinado problema, sendo que estas estão organizadas da maior para a menor, de forma a alcançar o princípio de Pareto, no qual 80% das consequências se devem a 20% das causas.
Fluxograma	Representação de um processo através de um esquema, recorrendo a símbolos específicos.
<i>Lean</i>	Metodologia de gestão caracterizada pela eliminação dos desperdícios, através da melhoria contínua (<i>Kaizen</i>) e envolvendo toda a organização.
<i>Outsourcing</i>	Contratação, por parte de uma organização, de outra para desenvolvimento de algum tipo de trabalho.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - METODOLOGIA UTILIZADA	5
FIGURA 2 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
FIGURA 3 - CUSTOS DE MANUTENÇÃO (<i>ICEBERG</i>) (SMITH AND MOBLEY, 2003)	10
FIGURA 4 - MATRIZ DE DECISÃO DESENVOLVIDA POR FERREIRA <i>ET AL.</i> (2019)	11
FIGURA 5 - MATRIZ DE DECISÃO DO MODELO DE OBSOLESCÊNCIA DESENVOLVIDA POR FERREIRA <i>ET AL.</i> (2019)	11
FIGURA 6 - NÍVEIS DE MANUTENÇÃO (EN 13306, 2010)	12
FIGURA 7 - TIPOS DE MANUTENÇÃO (EN 13306, 2010)	13
FIGURA 8 - TEMPO DE OPERAÇÃO <i>VERSUS</i> CAPACIDADE ESTIMADA E CARGA REAL (MECHEFSKE, 2010)	15
FIGURA 9 - CURVA DE <i>WEIBULL</i> (MOBLEY, 2016)	16
FIGURA 10 - TEMPO DE OPERAÇÃO <i>VERSUS</i> CAPACIDADE ESTIMADA E CARGA REAL (MECHEFSKE, 2010)	17
FIGURA 11 - OS OITO PILARES DA TPM (PASCAL <i>ET AL.</i> , 2019)	18
FIGURA 12 - TEMPO DE OPERAÇÃO <i>VERSUS</i> CAPACIDADE ESTIMADA E CARGA REAL (MECHEFSKE, 2010)	21
FIGURA 13 - EVOLUÇÃO DOS CUSTOS DO SISTEMA CBM (MOBLEY, 2016)	25
FIGURA 14 - EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DA FUNÇÃO DE MANUTENÇÃO (KOBACZY AND MURTHY, 2008)	26
FIGURA 15 - GERAÇÕES DA MANUTENÇÃO (MOUBRAY, 1992)	27
FIGURA 16 - EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 (VAIDYA <i>ET AL.</i> , 2018)	29
FIGURA 17 - CONCEITOS ASSOCIADOS À INDÚSTRIA 4.0 (CHHETRI <i>ET AL.</i> , 2017)	31
FIGURA 18 - RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA DE RESPOSTA E A AMPLITUDE (DINARDO <i>ET AL.</i> , 2018)	38
FIGURA 19 - RELAÇÃO ENTRE A SENSIBILIDADE E A FREQUÊNCIA DE UM ACELERÓMETRO [1]	41
FIGURA 20 - LOCAIS SELECIONADOS PARA ESTUDO (CAO <i>ET AL.</i> , 2012)	41
FIGURA 21 - LOCALIZAÇÕES PROPOSTAS PELA PCB PIEZOTRONICS [2]	42
FIGURA 22 - TIPOS DE DIAGNÓSTICO (MOBLEY, 2016)	52
FIGURA 23 - PROPOSTA DE DIVISÃO DOS MODELOS DE PROGNÓSTICO (BAE <i>ET AL.</i> , 2009)	53
FIGURA 24 - PROPOSTA DE DIVISÃO DOS MODELOS DE PROGNÓSTICO (ZHANG <i>ET AL.</i> , 2009)	54
FIGURA 25 - DIVISÃO DO MODELO DE PROGNÓSTICO BASEADO EM DADOS (ZHANG <i>ET AL.</i> , 2009)	55
FIGURA 26 - CRONOLOGIA DA EMPRESA ATÉ À CRIAÇÃO DA SISMA MEDICAL [3]	61
FIGURA 27 - MAQUETE DAS NOVAS INSTALAÇÕES DA EMPRESA [4]	62
FIGURA 28 - CONSTITUIÇÃO DO FUSO (ABELE <i>ET AL.</i> , 2010)	64
FIGURA 29 - LEGENDA DE UM ROLAMENTO DE ESFERAS [9]	65
FIGURA 30 - METODOLOGIAS UTILIZADAS	71
FIGURA 31 - MEIOS PARA EXECUÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA	72
FIGURA 32 - MODELO DE MANUTENÇÃO COM MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO E/OU EMISSÕES ACÚSTICAS NO DOMÍNIO DO TEMPO	73
FIGURA 33 - MODELO DE MANUTENÇÃO COM MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO	74

FIGURA 34 - MODELO DE MANUTENÇÃO COM MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO E/OU EMISSÕES ACÚSTICAS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	75
FIGURA 35 - SISTEMA CBM DE VIBRAÇÃO	76
FIGURA 36 - GRÁFICO TÍPICO DA IMPLEMENTAÇÃO DA CBM	77
FIGURA 37 - MODELO DO SISTEMA CBM GERAL DO FUSO	79
FIGURA 38 - BASE MAGNÉTICA PARA SENSOR [5]	81
FIGURA 39 - CAMADAS DO PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO TCP/IP (BADSHAH <i>ET AL.</i> , 2017; RILI, 2011)	87
FIGURA 40 - ESTRUTURA DO PROTOCOLO TCP/IP (RILI, 2011)	89
FIGURA 41 - OPERAÇÃO DO PROTOCOLO DHCP (YAIBUATES <i>AND</i> CHAIRICHAROEN, 2014)	89
FIGURA 42 - LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE VIBRAÇÃO E EMISSÕES ACÚSTICAS	90
FIGURA 43 - MODELO DE FUNCIONAMENTO PROPOSTO	91
FIGURA 44 - MODELO DE FUNCIONAMENTO	92

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DA CBM (MECHEFSKE, 2010)	23
TABELA 2 - DIFERENÇAS ENTRE OS SENSORES PIEZOELÉTRICOS E OS CAPACITIVOS MEMS (LU <i>ET AL.</i> 2018; ALBARBAR <i>ET AL.</i> , 2008)	40
TABELA 3 - DADOS DE REFERÊNCIA PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES LTSC (SS 728000-1:2014)	48
TABELA 4 - DADOS DE REFERÊNCIA PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES STSC (SS 728000-1:2014)	48
TABELA 5 - FATORES DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO POR VIBRAÇÃO (RASTEGARI, 2019)	58
TABELA 6 - RELAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E OS PARÂMETROS DE EA (HE <i>ET AL.</i> , 2009)	70
TABELA 7 - ACELERÓMETRO CAPACITIVOS MEMS IFM [5]	80
TABELA 8 - ELETRÔNICA DE DIAGNÓSTICO IFM [5]	82
TABELA 9 - <i>SOFTWARE</i> DE PARAMETRIZAÇÃO IFM [5]	83
TABELA 10 - <i>SOFTWARE</i> DE AQUISIÇÃO DE DADOS IFM [5]	84
TABELA 11 - ACESSÓRIOS NECESSÁRIOS PARA O SISTEMA [5]	84
TABELA 12 - SISTEMA DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES SELECIONADO [5]	85
TABELA 13 - SENSORES PIEZOELÉTRICOS VALLEN [8]	86
TABELA 14 - SISTEMA CBM DE AE	87

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodologia Utilizada	4
1.4	Estrutura da Dissertação	5
1.5	Empresa de Acolhimento	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	MANUTENÇÃO	9
2.1.1	TIPOS DE MANUTENÇÃO.....	12
2.1.1.1	MANUTENÇÃO CORRETIVA.....	14
2.1.1.2	MANUTENÇÃO PREVENTIVA.....	15
2.1.1.3	MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL	17
2.1.2	MANUTENÇÃO PREDITIVA	20
2.1.3	EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE FUNÇÃO MANUTENÇÃO.....	25
2.1.4	MANUTENÇÃO EM SISTEMAS INDÚSTRIA 4.0.....	28
2.2	INDÚSTRIA 4.0.....	28
2.2.1	CONCEITOS.....	30
2.2.2	ARQUITETURA DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO	34
2.3	SENSORIZAÇÃO	35
2.3.1	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	35
2.3.2	PROCESSAMENTO DE DADOS.....	44
2.3.2.1	ANÁLISE DO DOMÍNIO DO TEMPO	45
2.3.2.1.1	VIBRAÇÕES	47
2.3.2.1.2	EMISSÕES ACÚSTICAS	49
2.3.2.2	ANÁLISE DO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	50
2.3.3	TOMADA DE DECISÃO	51
2.3.3.1	DIAGNÓSTICO	51

2.3.3.2	PROGNÓSTICO	53
2.3.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	56
3	DESENVOLVIMENTO.....	61
3.1	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA DE ACOLHIMENTO	61
3.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	62
3.2.1	DESCRIÇÃO GENÉRICA DO TORNO	63
3.2.2	COMPONENTES EM ESTUDO.....	63
3.3	DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DO TRABALHO	65
3.3.1	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA	66
3.3.2	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA.....	66
3.3.2.1	VIBRAÇÕES E EMISSÕES ACÚSTICAS	67
3.3.2.2	VIBRAÇÕES.....	69
3.3.2.3	EMISSÕES ACÚSTICAS.....	69
3.3.3	ORGANIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS METODOLOGIAS.....	71
3.4	TEMPESTADE DE IDEIAS	72
3.4.1	ANÁLISE CRÍTICA DAS IDEIAS.....	72
3.4.2	ANÁLISE TÉCNICA	72
3.4.3	ANÁLISE ECONÓMICA.....	77
3.5	DEFINIÇÃO TÉCNICA DA SOLUÇÃO.....	78
3.5.1	SENSORES DE VIBRAÇÃO	80
3.5.2	SENSORES PARA EMISSÕES ACÚSTICAS	85
3.5.3	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO.....	87
3.6	MODELO DE FUNCIONAMENTO.....	90
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	97
4.1	CONCLUSÕES.....	97
4.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	98
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	101
5.1	ARTIGOS EM REVISTAS INTERNACIONAIS.....	101
5.2	NORMAS.....	107
5.3	OUTROS.....	107
6	ANEXOS	111

6.1	ANEXO 1	111
6.2	ANEXO 2	112
6.3	ANEXO 3	113
6.4	ANEXO 4	114
6.5	ANEXO 5	115
6.6	ANEXO 6	116
6.7	ANEXO 7	117
6.8	ANEXO 8	117
6.9	ANEXO 9	117
6.10	ANEXO 10	118
6.11	ANEXO 11	119
6.12	ANEXO 12	119
6.13	ANEXO 13	119

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA UTILIZADA

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

1.5 EMPRESA DE ACOLHIMENTO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Atualmente, devido à crescente competitividade na Indústria, as organizações procuram fazer mudanças no seu sistema produtivo, de modo a alcançar maior disponibilidade dos equipamentos, maior qualidade dos produtos e maior eficácia, com menos recursos. Uma das principais funções que influencia todos estes aspetos é a manutenção. A manutenção representa uma parcela significativa dos custos das organizações e, por isso, deve ser realizada de forma adequada. Se antes esta função era vista como “um mal necessário”, é hoje uma ferramenta fundamental para que os equipamentos atingiam maior disponibilidade, qualidade e produtividade.

Mais recentemente, com a evolução tecnológica, surgiu a manutenção preditiva, também designada por manutenção baseada na condição. Esta técnica permite atingir os objetivos mencionados acima, de uma forma mais eficaz e automatizada. Assim sendo, a manutenção preditiva consiste em monitorizar a condição de um equipamento em tempo real, utilizando-se por norma sensores que podem medir diferentes parâmetros, de acordo com o componente em monitorização. Ao ter conhecimento do estado atual do equipamento, é possível saber a existência de falhas e prever quando estas surgirão e, assim, planear corretamente as ações de manutenção atempadamente, evitando as paragens não planeadas. Deste modo, reduzem-se os custos de manutenção, a disponibilidade das máquinas aumenta e, conseqüentemente, a produtividade também.

No setor das máquinas de controlo numérico computadorizado (CNC), nomeadamente nas máquinas rotativas, mais concretamente nos tornos suíços, as falhas mais comuns são nos rolamentos que, apesar do baixo custo unitário, implicam a paragem da máquina para a sua substituição, que é por vezes morosa, levando a indisponibilidade e, conseqüentemente, custos acrescidos. Outro problema destes componentes é que muitas vezes o surgimento de defeitos não é detetado atempadamente, levando a falhas catastróficas. Desta forma, é relevante estudar um sistema de monitorização da condição que permita a deteção destes defeitos atempadamente.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como foco o desenvolvimento de um sistema de manutenção através da Monitorização da Condição. Este sistema pretende identificar a necessidade de manutenção dos rolamentos do fuso de um Torno Suíço na empresa Sá Couto e Monteiro, S.A.

Com a sua implementação, será possível monitorizar o estado deste componente ao longo do tempo, de forma a que a sua substituição possa ser planeada atempadamente, por vezes até incluída em manutenções de outros componentes, ou até em *setups*, de modo a reduzir o tempo de paragem da máquina. Deste modo, pretende-se reduzir o número elevado de paragens não planeadas, paragens estas que acarretam custos significativos para a empresa, associados a improdutividade, peças não conformes, horas extraordinárias de trabalho, e até mesmo falhas catastróficas, pois estas não são detetadas no estado inicial.

Deste modo, o objetivo final seria o aumento da produtividade das máquinas e aumento da sua eficiência.

1.3 Metodologia Utilizada

De acordo com os objetivos estipulados, a metodologia empregue foi a seguinte:

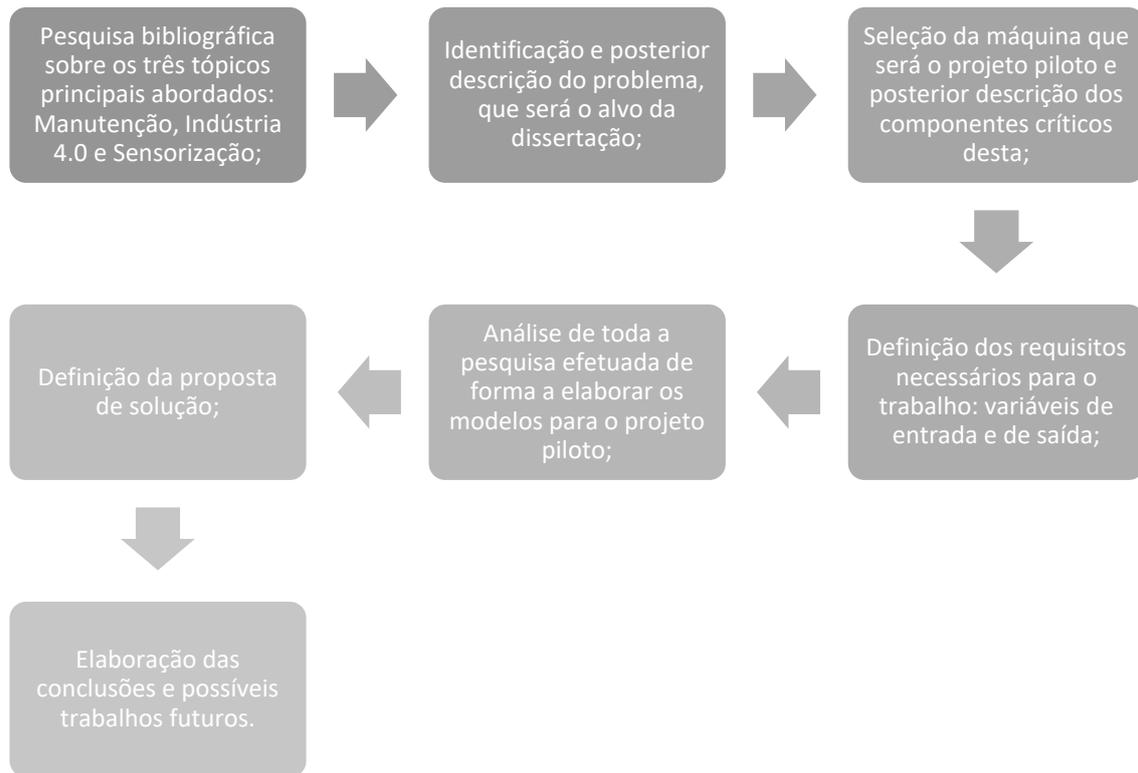


Figura 1 - Metodologia utilizada

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em quatro capítulos fundamentais. O primeiro capítulo retrata a introdução do trabalho, mais especificamente a contextualização do problema, os objetivos a atingir, a metodologia utilizada, a estrutura da tese em si e uma referência à empresa de acolhimento. No segundo capítulo é realizada a revisão bibliográfica, dividindo-se esta em três subcapítulos, o primeiro relativo à manutenção, história e tipos, o segundo explora os conceitos associados à Indústria 4.0, e o último a Sensorização, os passos a seguir e metodologias utilizadas. O terceiro capítulo descreve o desenvolvimento do trabalho, começando com uma descrição da empresa onde foi realizado o estágio, o problema, os requisitos que são necessários para aplicar o sistema de monitorização da condição de forma a solucioná-lo e, por fim, respetiva proposta de resolução. Por último, o quarto capítulo diz respeito às conclusões e propostas de trabalhos futuros, no qual se analisa se os objetivos propostos foram atingidos, as dificuldades sentidas e oportunidades de melhoria do projeto. Desta forma, a Figura 2 representa a estrutura descrita anteriormente.

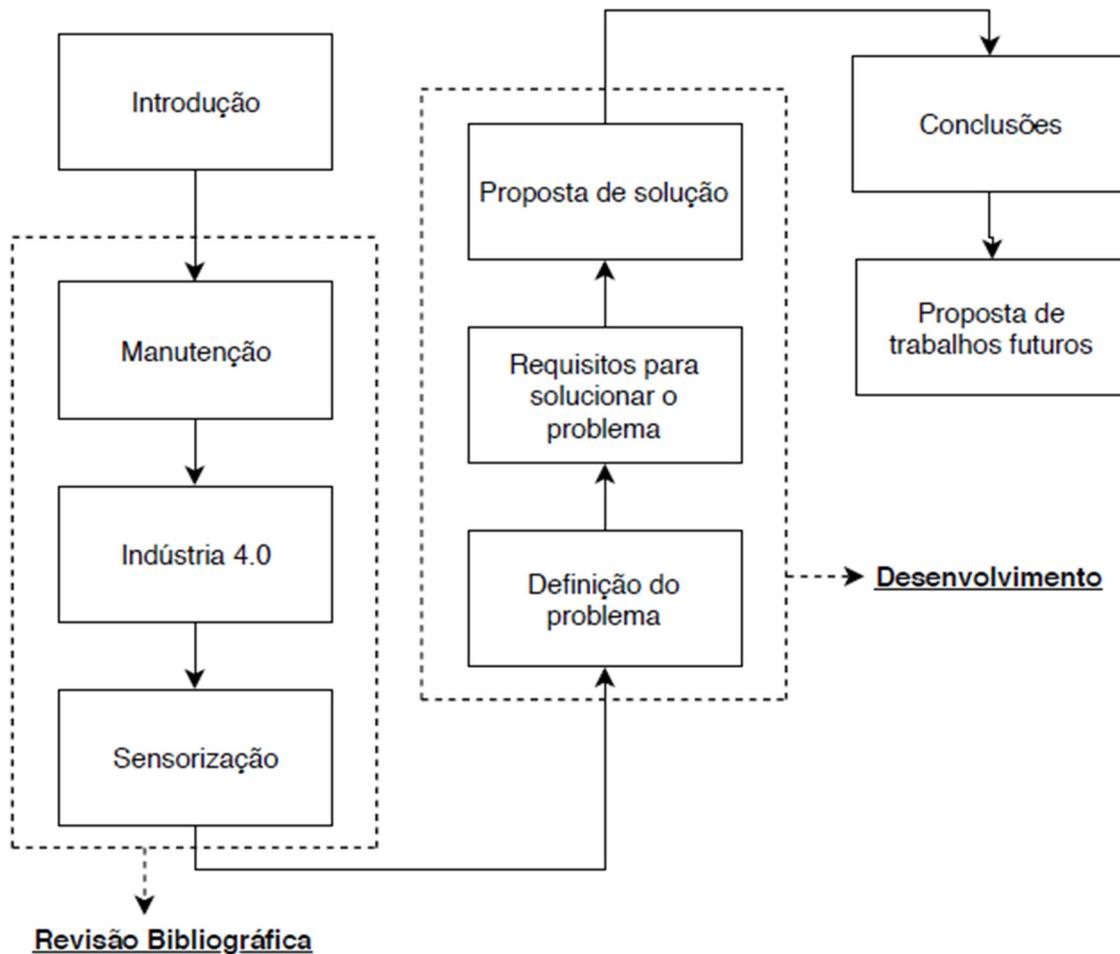


Figura 2 - Estrutura da dissertação

1.5 Empresa de Acolhimento

Esta dissertação foi desenvolvida com base num estágio curricular levado a efeito na empresa Sá Couto e Monteiro, SA., sediada em Silva Escura, Maia. A empresa dedica-se à maquinação por controlo numérico computadorizado (CNC) de componentes de precisão em série, e produz para os mais diversos setores, entre eles, a Indústria automóvel, médica, aeronáutica, ótica, alimentar e de Engenharia de precisão.

O estágio curricular iniciou-se a 8 de outubro de 2018 e terminou a 5 de abril de 2019, sob a orientação do Engenheiro José Pedro Sá Couto.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUTENÇÃO

2.2 INDÚSTRIA 4.0

2.3 SENSORIZAÇÃO

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica relativa aos temas abordados nesta dissertação, autenticando as noções e métodos empregues.

2.1 MANUTENÇÃO

Ao longo do tempo, as estratégias de manutenção têm-se desenvolvido de acordo com a evolução da Indústria, uma vez que atualmente existe maior exigência por parte dos consumidores, levando as organizações a procurarem ter vantagem competitiva (Heloisa *et al.*, 2016).

A norma europeia EN 13306:2010 define manutenção como um conjunto de técnicas que dizem respeito ao ciclo de vida de um componente, com o objetivo de o manter ou reparar, para que possa desempenhar a sua função (EN 13306, 2010).

Karabay *and* Uzman (2009) e Moreira *et al.* (2018) defendem que a manutenção é uma atividade relevante. Esta contribui para a diminuição dos impactos económicos devido a falhas nos componentes, os quais originam paragens não planeadas no sistema produtivo. Moreira *et al.* (2018) realizou um estudo na Indústria gráfica com o objetivo de reduzir custos e a utilização de produtos tóxicos no processo de impressão, de forma a aumentar a produtividade. Para tal, o autor implementou novos aditivos ao processo para reduzir tempos de *setup* e de secagem e a utilização de produtos tóxicos. Este adicionou, também, um programa de lavagem novo e um ativador de secagem, de modo a diminuir o tempo de ciclo, a quantidade de produtos de limpeza, o consumo energético e as atividades de manutenção. Por fim, com a sua implementação alcançou, ao fim de dois anos, os seguintes resultados: redução da utilização de poluentes, cerca de 30%; redução do consumo de produtos de limpeza e uma redução teórica de 1125 € de consumíveis; uma redução dos tempos de *setup* das máquinas em média de 8,3 minutos; aumento do tempo médio entre falhas (*Mean between failure – MTBF*) em duas das três máquinas; aumento médio da eficiência global do equipamento (*Overall Equipment Effectiveness - OEE*) de 3%; e melhoria da qualidade do produto da organização.

Diferentes autores atribuem diferentes pesos aos custos das atividades de manutenção. Mechefske (2010) afirma que estes representam cerca de 50% dos custos produtivos,

enquanto que para Mobley (2016), estes apresentam uma gama de 15 a 60%, pois dependem da Indústria em questão. Arslankaya *and* Atay (2015) são também da opinião que estes variam de acordo com o setor, mas com uma faixa percentual diferente, de 5 a 40%, podendo ir até 70% nalguns casos. Smith *and* Mobley (2003) comparam inclusive os custos de manutenção a um *iceberg* (Figura 3), pois na maioria dos casos apenas se presta atenção aos custos diretos, não tendo em conta os custos indiretos da manutenção.

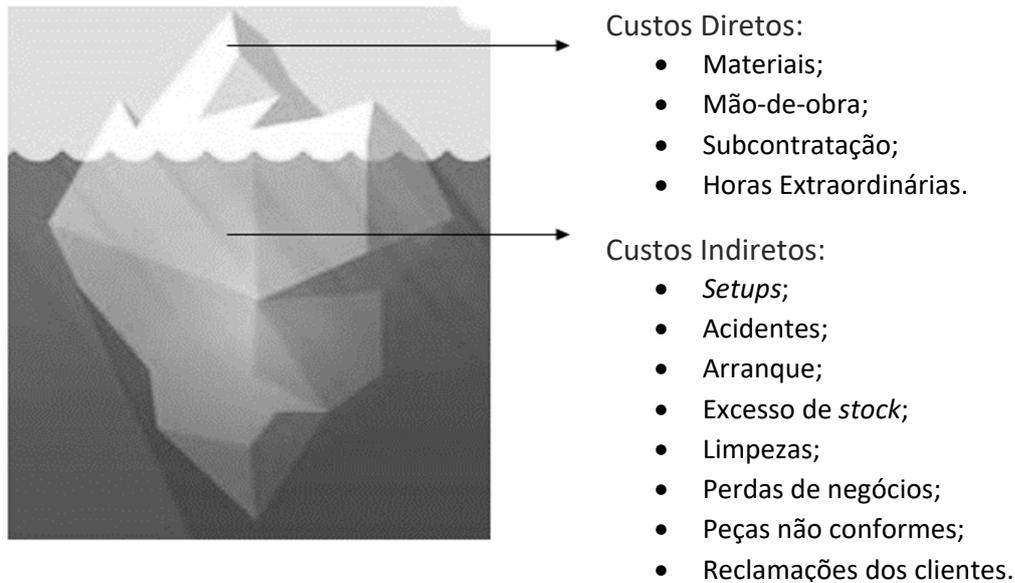


Figura 3 - Custos de manutenção (*iceberg*) (Smith *and* Mobley, 2003)

Através da Figura 3 e tendo em conta as percentagens representativas dos custos de manutenção, a gestão da manutenção assume um papel relevante (Arslankaya *and* Atay, 2015). Deste modo, a gestão da manutenção é o conjunto das atividades que estabelecem os objetivos, estratégias e responsabilidades da manutenção, assim como a sua implementação com recurso a planeamento, controlo e melhoria das suas atividades e economia (EN 13306, 2010).

Ferreira *et al.* (2019) realizou um trabalho com base num caso de estudo na indústria, onde criou e aplicou dois indicadores de desempenho, o RPR, rácio entre manutenção reativa-proativa e o MPR, rácio entre a manutenção e a produção, e um modelo de obsolescência para estudar a condição dos componentes eletrónicos do equipamento presente na linha de produção. Para os indicadores chave de *performance* (KPI), o autor desenvolveu uma matriz, conforme mostra a Figura 4.

RPR>0,5	Razoável		Mau	Muito mau
0,25<RPR≤0,5	Bom	Razoável		Mau
0,15<RPR≤0,25	Muito bom	Bom	Razoável	
0≤RPR≤0,15	Excelente	Muito bom	Bom	
	0<MPR≤0,01	0,01<MPR≤0,03	0,03<MPR≤0,05	MPR>0,05

Figura 4 - Matriz de decisão desenvolvida por Ferreira *et al.* (2019)

No caso do modelo de obsolescência, Ferreira *et al.* (2019), desenvolveu-o em duas fases. A primeira avalia qual o componente mais crítico para que o equipamento exerça a sua função corretamente. Na segunda, por sua vez, estuda as consequências da mitigação da obsolescência no sistema produtivo. Os valores das variáveis respectivas a cada fase vão de um a quatro, do pior ao melhor, respetivamente, que será depois multiplicado pelo peso de decisão. Tal como para os KPI, para o modelo também foi desenvolvida uma matriz de decisão, tal como mostra a Figura 5.

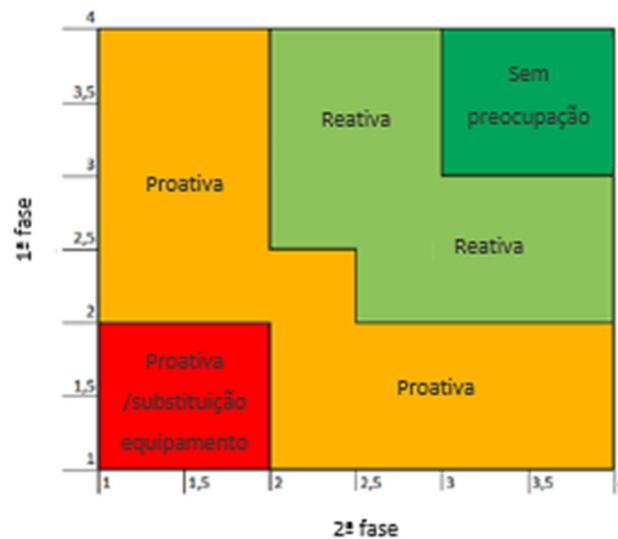


Figura 5 - Matriz de decisão do modelo de obsolescência desenvolvida por Ferreira *et al.* (2019)

Aplicando ao caso de estudo, a indústria dos lacticínios, o autor conclui que os KPI são mais aconselháveis para serem usados com uma periodicidade trimestral, devido à

demora na obtenção de resultados ao implementar as melhorias na manutenção. Segundo este autor, apesar deste estudo ter sido aplicado numa indústria específica, os KPI e o modelo podem ser aplicados a qualquer organização, com objetivos devidamente estabelecidos de acordo com a situação.

A norma EN 13306:2010 divide as atividades de manutenção em cinco níveis, representados na Figura 6.

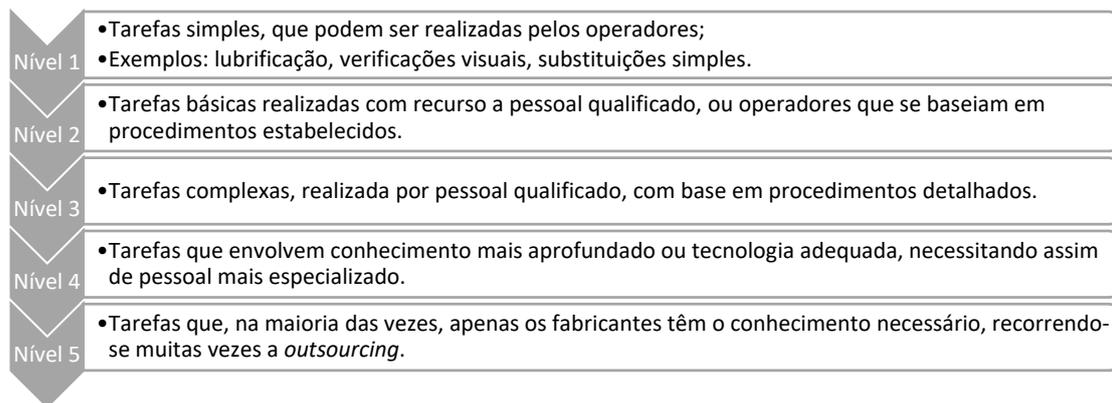


Figura 6 - Níveis de Manutenção (EN 13306, 2010)

2.1.1 TIPOS DE MANUTENÇÃO

Na literatura não se encontra apenas uma forma de dividir a manutenção. Por exemplo, Arslankaya *and* Atay (2015) dividem a manutenção em planeada e não planeada, e dividem depois a manutenção planeada em periódica, preditiva e preventiva.

Segundo Arslankaya *and* Atay (2015), a manutenção não planeada é executada nas organizações cujos equipamentos têm uma reparação simples e económica, com um grande inventário. Como a reparação e/ou substituição de componentes é relativamente simples, exige menos ou nenhuma mão-de-obra especializada. Todos estes fatores tornam esta a estratégia ideal nesta situação, porque contribuem para baixos custos de manutenção. Porém, este não é o caso da grande maioria das organizações e é nesta circunstância que a manutenção planeada é fundamental. Neste caso, cada componente está a ser controlado, de forma que as falhas se detetam durante a manutenção, e não antes, como na estratégia anterior. Deste modo, esta manutenção tem como principais vantagens:

- Diminuição das interrupções, avarias e custos;
- Produção bem planeada e segura;
- Alta disponibilidade;
- Aumento da vida útil dos sistemas;

- Minimização do *stock* de peças de substituição;
- Quantidade mais reduzida de mão-de-obra para esta atividade.

Santos *et al.* (2019) realizou um estudo de categorização da criticidade de equipamentos de quatro unidades industriais. Desta forma, a escolha e implementação de uma estratégia de manutenção é mais adequada. Neste estudo, aplicou-se a estratégia RCM (*Reliability centered maintenance* – Manutenção centrada na fiabilidade) para os equipamentos do tipo A, os mais críticos. Com a aplicação desta metodologia, o autor alcançou uma diminuição de homens-hora por ano dedicados à manutenção preventiva de, aproximadamente, 202, uma redução de KPI de 0,73% do indicador Taxa global de indisponibilidade por falha, melhor controlo da manutenção e conseqüente redução dos seus custos. Porém, como a maioria das implementações de manutenção apenas mostram resultados a médio/longo prazo, o autor espera que os efeitos sejam ainda mais animadores no futuro. Outro dado importante que o autor refere é que a criticidade dos ativos deve ser revista periodicamente.

Nesta dissertação, será considerada a tipologia proposta pela norma EN 13306:2010, presente na Figura 7.



Figura 7 - Tipos de Manutenção (EN 13306, 2010)

Esta tipologia estabelece que a manutenção corretiva é uma atividade não planeada, enquanto a manutenção preventiva é planeada (EN 13306, 2010).

Bengtsson *and* Lundström (2018) utilizam a mesma divisão que a EN 13306:2010 e fazem a seleção do tipo de manutenção mais adequado para uma organização de forma diferente de Arslankaya *and* Atay (2015). Estes autores utilizam a frequência da falha e o tempo do seu desenvolvimento como fatores decisivos. Desta forma, a manutenção não planeada é ideal quando as falhas são aleatórias, e não têm tempo de desenvolvimento. Para manutenção planeada estabelece-se que as falhas ocorram

numa frequência regular. Dentro da manutenção planeada, a predeterminada é ideal quando não existe um tempo de desenvolvimento e a preditiva na situação oposta, ou seja, com tempo de desenvolvimento. Acrescentam ainda a eficácia da manutenção corretiva nas situações em que a falha de um componente não compromete o funcionamento da máquina.

2.1.1.1 MANUTENÇÃO CORRETIVA

Em relação à manutenção corretiva, o componente é substituído quando deixa de efetivar o seu propósito definido, ou seja, quando falha (Mechefske, 2010). Esta técnica traduz-se em custos de *stock* de peças de reposição e custos com horas extraordinárias de trabalho elevados, alta indisponibilidade dos equipamentos e, por isso, baixa disponibilidade para produção (Dhami *et al*, 2018). Para a sua correta aplicação, a equipa de manutenção teria de assegurar um *stock* elevado de peças de substituição para quase a totalidade dos equipamentos, ou, em alternativa, teria de existir uma lista de fornecedores que assegurassem a rápida reposição das peças necessárias. Como é de esperar, tanto uma alternativa como a outra representam elevados custos para a empresa (Mobley, 2016; Scheffer *and* Girdhar, 2004). Em síntese, esta técnica representa, em média, quantias três vezes superiores à manutenção planeada (Mobley, 2016). Porém, Bengtsson and Lundström (2018) afirmam que existe uma vantagem clara deste método, o conhecimento do momento exato em que é necessária a manutenção.

Esta pode ainda ser dividida em: diferida, quando não é feita imediatamente após a falha; e imediata, quando é realizada no momento da falha, para evitar consequências catastróficas futuras no equipamento. Esta estratégia ilustra a forma mais ineficaz de preservar uma instalação de produção (EN 13306, 2010).

Mechefske (2010) estabelece um gráfico que relaciona o tempo de operação da máquina com a capacidade estimada e a carga real neste tipo de manutenção, que pode ser observado na Figura 8. A falha ocorre quando existe interceção entre a capacidade e a carga, sendo que a manutenção acontece no instante a seguir.

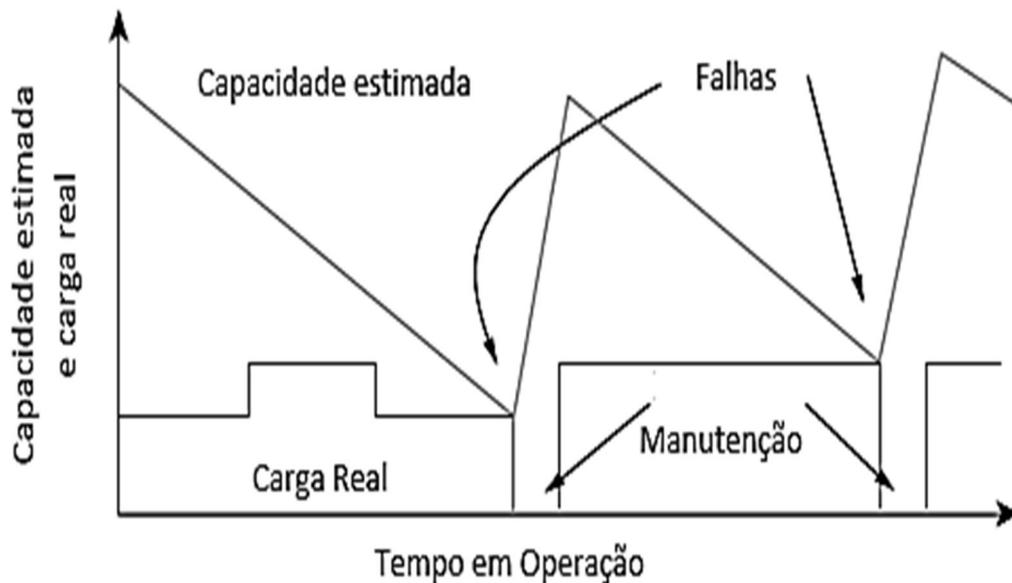


Figura 8 - Tempo de operação *versus* capacidade estimada e carga real (Mechefske, 2010)

Desta forma, a manutenção preventiva surgiu como um mecanismo para redução dos custos não planeados associados à manutenção corretiva, para aumento da disponibilidade e, também, como forma de redução da probabilidade de surgirem falhas (Mobley, 2016).

2.1.1.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Dentro da manutenção preventiva, a manutenção predeterminada baseia-se num intervalo de tempo estabelecido, ou num número de unidades de uso, mas sem conhecimento algum da condição atual do item. O intervalo de tempo que é definido apoia-se numa estatística do Tempo de vida do equipamento, sendo a mais trivial a “curva de Weibull” ou MTTF (*Mean time to failure* - Tempo médio até à falha), Figura 9, onde se observa que é provável que exista um número elevado de falhas no tempo inicial do equipamento, baixando ao longo do tempo de operação normal e, aumentando novamente à medida que se aproxima do fim de vida útil (Mobley, 2016).

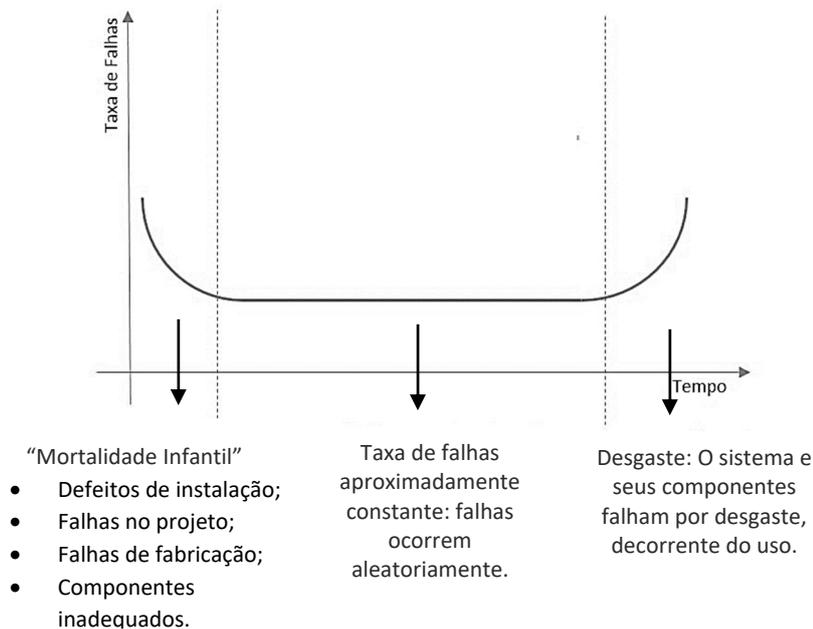


Figura 9 - Curva de *Weibull* (Moblely, 2016)

Para se aplicar eficazmente esta técnica, as seguintes condições têm de estar satisfeitas (Mechefske, 2010):

- Existirem dados (ou que estes possam ser obtidos) que descrevem a taxa de falha;
- Distribuição limitada de falhas, para se obter o MTTF;
- Manutenção, quando executada, restabelece quase a totalidade da máquina;
- Existe um modo de falha, e este é conhecido;
- Redução dos custos de manutenção com a aplicação desta estratégia, ao contrário do que acontece com a corretiva;
- Peças de substituição económicas.

Tal como para a manutenção corretiva, para esta atividade Mechefske (2010) também estabelece um gráfico que relaciona o tempo de operação da máquina com a capacidade estimada e a carga real, que pode ser observado na Figura 10. Neste caso, a manutenção é executada em intervalos de tempo pré-estabelecidos, de modo a evitar a ocorrência de falhas. Assim sendo, a capacidade estimada nunca se interceta com a carga real, logo nunca deverá haver uma falha inesperada. Este é o principal objetivo desta técnica.

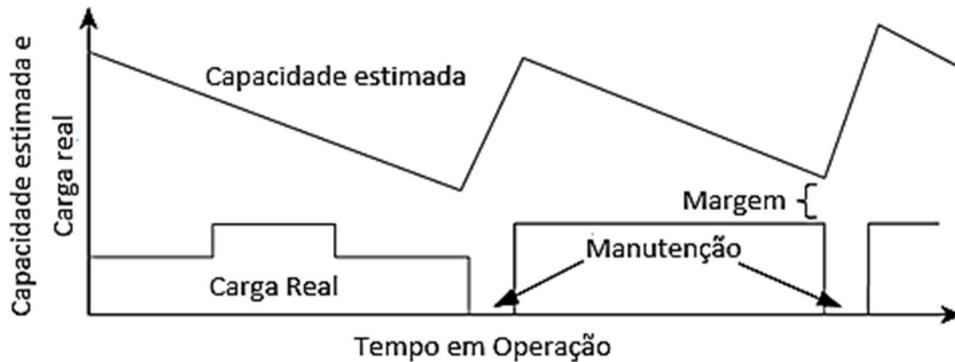


Figura 10 - Tempo de operação *versus* capacidade estimada e carga real (Mechefske, 2010)

As principais desvantagens desta estratégia são o facto de os componentes serem muitas vezes substituídos desnecessariamente, pois ainda tinham vida útil restante, o que pode levar a uma diminuição da produtividade e do tempo produtivo, devido ao excesso de atividades de manutenção e acréscimo de custos. Por outro lado, pode também acontecer o contrário, as manutenções são realizadas “tarde de mais”, pois este método é estabelecido com uma base temporal linear, o que nem sempre é a realidade de operação dos equipamentos, o que também acarreta acréscimo de custos com esta atividade. Deste modo, é provável que ocorram danos secundários dispendiosos devido a falhas (Scheffer *and* Girdhar, 2004). Em suma, a principal dificuldade desta estratégia é a determinação eficaz da frequência de manutenção, sendo a Manutenção Preditiva a solução para esta desvantagem (Bengtsson *and* Lundström, 2018).

A manutenção baseada na condição, ou preditiva, por sua vez, inclui a combinação de ferramentas para monitorização da condição do componente, como forma de antecipar quando se deve efetuar a manutenção (EN 13306, 2010). Esta última será descrita em maior pormenor no capítulo 2.1.2.

2.1.1.3 MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL

Foi no Japão, na década de 70, que surgiu o conceito de Manutenção Produtiva Total (*Total productive maintenance* - TPM). O TPM é uma metodologia que visa integrar todos os colaboradores na função de manutenção, unindo esta função com a produção, com o objetivo de maximizar a eficácia dos ativos, maximizar a produtividade e tendo sempre em conta a melhoria contínua (Mwanza *and* Mbohwa, 2015; Pascal *et al.*, 2019). Deste modo, decompondo as palavras que compõe o acrónimo TPM, tem-se que: Total,

representa que todos os colaboradores, desde o chão-de-fábrica até à gestão de topo estão envolvidos; Produtiva, significa que a produção tem que ir sempre de encontro às expectativas do cliente, sem desperdício nas diferentes atividades; Manutenção, por sua vez, é manter as condições dos ativos na forma do desempenho possível (Mwanza *and* Mbohwa, 2015).

O TPM é usualmente apresentado na seguinte forma (Figura 11) (Pascal *et al.*, 2019):

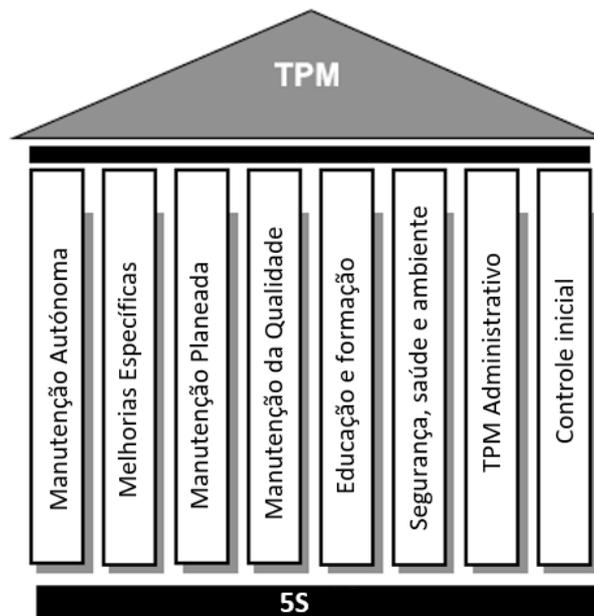


Figura 11 - Os oito pilares da TPM (Pascal *et al.*, 2019)

Desta forma, para se implementar o TPM é necessário primeiro aplicar-se à organização os 5S. Os 5S constituem uma técnica que: arruma, organiza, limpa, padroniza e depois sustenta, o local de trabalho. Só depois desta técnica aplicada é que se pode corretamente implementar o TPM (Pascal *et al.*, 2019).

Existem algumas diferenças entre a manutenção preventiva (MP) e o TPM. Uma das principais diferenças é que o primeiro pilar da TPM é a manutenção autónoma, não exigida na MP, em que existe o compromisso dos operados em manter os seus equipamentos, aplicando tarefas básicas da manutenção, como é o caso da lubrificação, deixando as tarefas mais complexas de manutenção para os técnicos especializados (Chan, Lau, Ip, Chan, *and* Kong, 2005).

Porém, muitas organizações implementam esta metodologia, mas depois não avaliam o seu desempenho. Existem vários indicadores, entre eles: Fluxograma, Diagrama de Pareto, Cartas de Controlo, Eficiência global do equipamento (OEE), entre outras (Chan *et al.*, 2005; Mwanza *and* Mbohwa, 2015; Pascal *et al.*, 2019).

O OEE é o método mais amplamente utilizado e visa maximizar a eficácia dos equipamentos. Este método assenta em três variáveis: disponibilidade (Di), desempenho/*performance* (P) e qualidade (Q). Estes podem ser calculados através das seguintes equações (Chan *et al.*, 2005):

$$Di (\%) = \frac{\text{tempo total disponível} - \text{tempo de inatividade}}{\text{tempo total disponível}} \times 100 \quad (1)$$

$$P (\%) = \frac{\text{capacidade de produção real}}{\text{capacidade de produção nominal}} \times 100 \quad (2)$$

$$Q (\%) = \frac{\text{unidades produzidas conformes}}{\text{unidades produzidas totais}} \times 100 \quad (3)$$

Deste modo, o OEE é dado por (Chan *et al.*, 2005):

$$OEE (\%) = Di \times P \times Q \quad (4)$$

Após se calcular o OEE da organização, deve-se compará-lo com o OEE de classe mundial, que é de 85%, sendo este o *benchmarking*, ou seja, o que se quer atingir (Mwanza *and* Mbohwa, 2015).

O resultado proveniente do OEE está relacionado com as perdas que ocorrem. Estas podem dividir-se de diferentes formas, de acordo com o autor. Aqui, considerou-se as seis perdas enunciadas por Chan *et al.* (2005), sendo que estas dizem respeito a diferentes variáveis do OEE:

- Disponibilidade:
 - Perdas devido a avarias;
 - Perdas devido a ajustes, como por exemplo quando o tipo de produto muda, quando se altera a ferramenta, limpeza após uma produção, entre outros.
- *Performance*:
 - Perdas devido a pequenas paragens ou em velocidade muito baixa, por mau funcionamento, que é rapidamente resolvido;
 - Perdas devido à velocidade mais reduzida do equipamento, que não está a trabalhar na sua velocidade máxima admissível.
- Qualidade:
 - Perdas devido a peças não conformes;

- Perdas devido a arranques, após uma interrupção, por exemplo, para manutenção, férias, ou no início do turno.

Singh *et al.* (2013) implementou a TPM numa indústria de componentes automóveis. Começou pela aplicação dos 5S, dando a conhecer aos colaboradores o seu propósito e benefício para a organização. De seguida, foi implementando os pilares do TPM. Para a Manutenção Autónoma, foi dada diariamente formação aos operadores, os quais passaram a ser responsáveis por manter as suas máquinas limpas. Foram realizadas folhas de verificação, as quais são preenchidas pelos operadores e supervisionadas pelos respetivos responsáveis do chão-de-fábrica. Outras implementações de melhoria contínua foram aplicadas de acordo com os restantes pilares da TPM, como elaboração de diagramas de *Ishikawa* para detetar as causas dos problemas e mudanças a nível de *layout*. Como resultado, obteve-se um aumento do OEE de 63% para 79%. Os autores concluíram que os fatores fundamentais para uma implementação de sucesso são o envolvimento dos colaboradores e o apoio da alta administração.

Mwanza *and* Mbohwa (2015) realizou um estudo em que utilizou o cálculo do OEE como forma eficaz de implementar a TPM, sendo que deste modo, também o OEE iria melhorar. Para isso utilizou questionários, observou as instalações fabris e seus registos. Comparou então o OEE com o de classe mundial, sugeriu a implantação do TPM, com o seu principal objetivo: zero falhas, zero defeitos e zero ajustes. Concluiu por fim que, adotando o TPM, as perdas são reduzidas, e a empresa torna-se mais rentável e competitiva.

Guariente *et al.* (2017) implementou, no setor automóvel, a função de manutenção autónoma, com o objetivo de reduzir as paragens não planeadas nas máquinas. Deste modo, foi transferida a responsabilidade para os operadores de realizar operações de limpeza, organização e verificação dos seus postos de trabalho e equipamentos. Como resultado, este autor aumentou em 10% a taxa de disponibilidade mensal das máquinas e em 8% o OEE. Consequentemente, o MTBF aumentou e o MTTR (*Mean time to repair* – tempo médio de reparação) foi reduzido.

Deste modo, é possível verificar também que a TPM pode ser usada como ferramenta para avaliar a técnica de manutenção que a empresa emprega correntemente (Pascal *et al.*, 2019).

2.1.2 MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção baseada na condição (CBM) ou manutenção preditiva, é uma técnica que define as ações de manutenção, tendo por base um programa de monitorização da condição real de um dado sistema. A sua principal característica é o facto de estas ações apenas serem despoletadas quando existem evidências de má condição do equipamento, reduzindo o número de tarefas de manutenção desnecessárias,

prolongando a vida útil deste e reduzindo assim os custos associados à manutenção (Dhami *et al.*, 2018; Jardine, 2006). Outra característica relevante é que esta medição pode ser feita sem interromper as operações normais de funcionamento da máquina (Kiangala *and* Wang, 2018).

A norma EN 13306:2010 define monitorização da condição como uma tarefa em tempo real, que mede parâmetros estabelecidos de um ativo, podendo ser realizada em intervalos predeterminados ou em contínuo. Deste modo, relativamente à frequência de monitorização da condição, quando os equipamentos em estudo não são críticos e têm modos de falha conhecidos, então a monitorização periódica deve ser utilizada. Por outro lado, quando os componentes são críticos, de elevado valor monetário e a sua paragem implica grandes custos para a empresa, então devem ser monitorizados em contínuo, ou com grande frequência. Realizada periodicamente, a monitorização emprega equipamentos portáteis, recolhendo dados de forma intermitente, quando se monitoriza em contínuo ou muito frequentemente os equipamentos de monitorização estão permanentemente instalados (Mechefske, 2010). Esta técnica de manutenção só pode ser aplicada porque, antes de ocorrerem as falhas, pelo menos grande partes destas, passam por um modo de degradação ou exibem algum tipo de indício de que vão acontecer (Kiangala *and* Wang, 2018).

Tal como para as estratégias anteriores, Mechefske (2010) representa graficamente a Manutenção Preditiva como é observado na Figura 12.

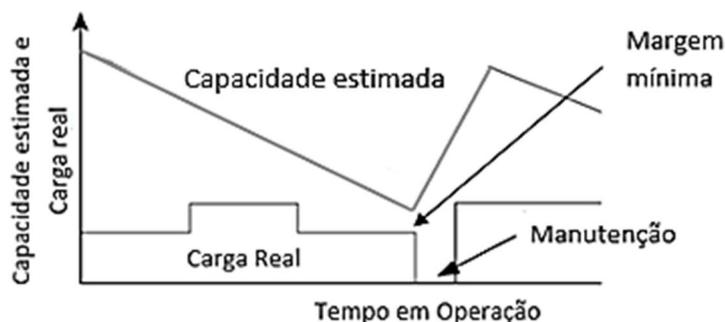


Figura 12 - Tempo de operação *versus* capacidade estimada e carga real (Mechefske, 2010)

Neste caso, a margem entre a carga e a capacidade estimada dos equipamentos é menor que na manutenção predeterminada, no entanto, não existe interceção. Este facto acontece porque a manutenção deve ocorrer imediatamente antes da falha (Mechefske, 2010).

Para esta monitorização das máquinas, os dispositivos mais utilizados são os sensores (Dinardo *et al.*, 2018). Com a instalação dos sensores, pode então implementar-se um

programa de Manutenção Preditiva, composto essencialmente por (Paolanti *et al.*, 2018):

- Medição da(s) grandeza(s) física(s) selecionada(s);
- Estimativa dos parâmetros de controlo;
- Reconhecimento da condição do sistema;
- Planeamento de atividades de manutenção antes da ocorrência da falha.

Um programa de CBM permite a deteção de uma falha ou processo de desgaste que provocou uma mudança nos parâmetros de controlo, dependendo a escolha destes dos dados da máquina que precisam de ser recolhidos, analisados e processados (Kiangala *and* Wang, 2018; Vanraj, *et al* 2016). Estes podem ser estabelecidos através da medição de diversas grandezas físicas, sendo os mais comuns a vibração e o som, mas a temperatura, emissão acústica, análise de lubrificantes, entre outras técnicas, podem também ser utilizadas (Road, 2014).

Apesar da manutenção preditiva poder colmatar as desvantagens tanto da manutenção corretiva, como da predeterminada, ela só pode ser aplicada eficazmente em 20% dos modos de falha, e os seus custos são rentáveis em apenas metade desses casos. Deste modo, pode não ser a estratégia adequada para determinadas indústrias (Bengtsson *and* Lundström, 2018; Vogl, *et al* 2019). Nos casos em que esta não é adequada, a organização deve procurar gerir o inventário de peças de substituição, gerir os equipamentos atempadamente, definir rotinas de manutenção predeterminada, formar os colaboradores e padronizar as tarefas, como forma de redução de erros (Bengtsson *and* Lundström, 2018).

Mechefske (2010) define como vantagens e desvantagens da implementação da CBM as representadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens da CBM (Mechefske, 2010)

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Maior fiabilidade e disponibilidade;	Custos significativos dos equipamentos de monitorização;
Maior eficiência na produção;	Custos operacionais;
Melhor gestão do risco, pois existe menor indisponibilidade;	Requer pessoal especializado;
Menores custos de manutenção;	Compromisso da Gestão de Topo;
Menores <i>stocks</i> de peças de substituição;	Tempo extenso para recolha inicial dos dados da máquina.
Maior segurança das instalações;	
A máquina opera na sua capacidade adequada;	
Maior vida útil da máquina;	
Melhor relação com os clientes;	
Redução das falhas após a reparação.	

Tal como a Manutenção evoluiu ao longo dos anos, também a Manutenção Preditiva se foi alterando, sendo já mencionada na década de 60. Inicialmente, esta técnica consistia apenas numa inspeção visual dos equipamentos (Bengtsson and Lundström, 2018; Paolanti *et al.*, 2018). Atualmente, já pode ser empregue como um método automatizado com um processamento e análise automáticos, usando técnicas baseadas na Indústria 4.0, como *Machine Learning* (Paolanti *et al.*, 2018). Apesar das recentes evoluções tecnológicas, já nos anos 80 existiam fábricas a economizar 25% dos seus gastos com a aplicação desta técnica (Kiangala and Wang, 2018).

Apesar dos benefícios aparentes da Manutenção Preditiva, ainda existem organizações que não implementaram esta técnica, focando-se apenas na Manutenção Predeterminada. Esta última, segundo um estudo, apenas deteta 70% das falhas existentes, sendo que a CBM deteta 90%, sendo mais eficiente, permitindo a diminuição de paragens não planeadas de melhor forma que a primeira (Kiangala and Wang, 2018).

Bengtsson and Lundström (2018) referem que para se ser bem-sucedido ao aplicar a CBM, é necessário distribuir funções e responsabilidades, tanto entre operadores como entre o pessoal de manutenção. No caso dos operadores, estes têm como função as tarefas básicas de manutenção dos equipamentos, como limpeza, lubrificação e pequenos ajustes, tarefas relacionadas com a produção, como as operações e a inspeção visual, utilizando esta última também como meio de monitorizar precocemente possíveis falhas, pois são eles que estão constantemente em contacto com as máquinas. O pessoal de manutenção, por sua vez, deverá fornecer o apoio técnico para as atividades básicas de manutenção dos operadores, deverá monitorizar as condições,

fazer revisões gerais aos equipamentos e propor/aplicar melhorias a partir das conclusões tiradas com o controlo da condição. Os colaboradores, operadores e pessoal de manutenção, deverão ao longo do tempo aperfeiçoar o seu conhecimento nas áreas em que estão envolvidos.

Bengtsson *and* Lundström (2018) realizaram uma experiência numa oficina de pintura, utilizando o sistema de ventilação como alvo do seu estudo. Até ao ano de 2010, a empresa realizou corretamente atividades de manutenção planeada, incluindo manutenção preditiva. Deste modo, entre 2007 e 2010 existiram 115 atividades de manutenção neste sistema, incluindo planeadas e não planeadas, 26 das quais decorrentes de avarias. Com a implementação da análise das causas raiz dos problemas e posterior implementação de melhorias a partir de 2010, verificou-se que entre 2013 e 2016 o número de atividades de manutenção desceu para 57, das quais apenas 6 foram avarias. Com a sua experiência, demonstrou que a correta implementação de uma estratégia de manutenção é importante, mas melhores resultados são atingidos quando se faz uma análise da causa das falhas, procurando melhorar o sistema. Esta mesma conclusão, de que deve ser feita uma análise da causa raiz das falhas (*Root cause failure analysis* - RCFA) para uma implementação eficaz de um programa de manutenção preditiva, é também suportada por (Rastegari *et al* 2017).

A RCFA tem como objetivo identificar a causa principal de uma falha, tendo por finalidade a correção dessas falhas, de modo a que não voltem a ocorrer (Gulati *and* O'Hanlon, 2013; Márquez, 2007). Esta análise pode ser feita de acordo com várias situações (Gulati *and* O'Hanlon, 2013):

- Identificação da causa de um acidente relacionado com um problema de segurança, saúde ou ambiente;
- Identificação da causa de problemas na produção relativamente ao produto;
- Identificação da causa de problemas nos processos da organização;
- Identificação da causa de problemas em ativos ou sistemas, inclusive na manutenção.

Gulati *and* O'Hanlon (2013) definem seis passos para realização da RCFA, são eles:

- Definição da falha: investigação detalhada da falha em si e do ativo que falhou;
- Recolha de dados: análise dos eventos que antecederam a falha, das evidências de que o problema iria suceder e o seu impacto;
- Identificação dos possíveis fatores de falha: com a ajuda de dados históricos;
- Desenvolvimento de soluções e recomendações: ter em conta o tipo de natureza das causas, investigando cada uma delas (Gulati *and* O'Hanlon, 2013; Márquez, 2007):
 - Física: falhas visíveis de ativos;
 - Humana: erros humanos;
 - Organizacional: falhas de gestão, como por exemplo de procedimentos e decisões.
- Implementação das soluções: planeamento de ações corretivas e de procedimentos de análise de melhorias ao longo do processo;

- Aplicação de ferramentas para medição da eficácia do RCFA.

Existem algumas ferramentas que se podem utilizar para fazer esta análise, como o Diagrama de Pareto, a análise dos modos de falha e efeitos (*Failure mode and effect analysis* - FMEA), Diagrama de *Ishikawa*, entre outros (Gulati and O’Hanlon, 2013).

Os custos associados à implementação de um programa de CBM também são relevantes. Inicialmente, é necessário um grande investimento, que a longo prazo será recuperado se o sistema for corretamente aplicado. Mobley (2016) estabeleceu o seguinte gráfico deste mesmo custo ao longo do tempo (Figura 13):

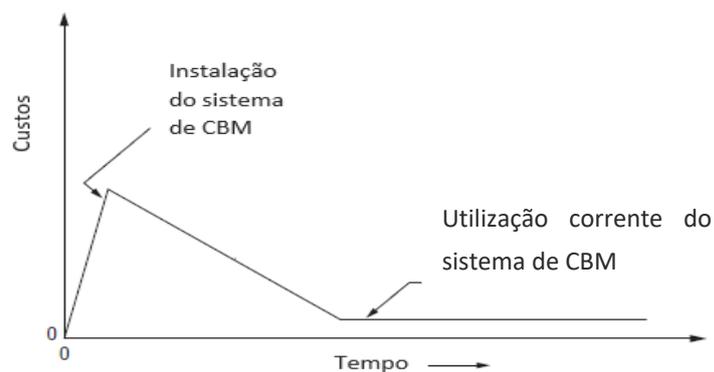


Figura 13 - Evolução dos custos do sistema CBM (Mobley, 2016)

Ao longo do tempo, se corretamente utilizado, o sistema CBM vai permitir poupar dinheiro à organização. Por vezes, não é claro inferir no tempo necessário para tal acontecer, fazendo com que a justificação da sua implementação seja mais difícil (Mobley, 2016).

2.1.3 EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE FUNÇÃO MANUTENÇÃO

Quando se deu o surgimento das instalações fabris, estas eram simples e pouco mecanizadas (Kobbacy and Murthy, 2008). Deste modo, a manutenção era sempre corretiva, uma vez que o interesse era obter a maior produtividade possível, mantendo as máquinas sempre em funcionamento, sem que houvesse qualquer gestão da atividade de manutenção (Simões, 2016). Durante esta época, esta função era vista como uma parte inevitável da produção, responsável por restabelecer a condição das máquinas o mais rápido possível (Kobbacy and Murthy, 2008). Mais tarde, esta atividade passou a ser uma Função Técnica, passando a ser aplicada a Manutenção preventiva com base em intervalos de tempo. Na década de 80, deixou de ser uma subfunção da produção, para ser uma função independente e capaz de gerar lucro, se bem

estabelecida. Contudo, a tecnologia foi-se desenvolvendo, os processos e produtos tornaram-se complexos, a Indústria tornou-se mais competitiva devido aos requisitos dos clientes de maior qualidade e fiabilidade dos seus produtos, fazendo emergir tecnologias como a Manutenção Preditiva. A manutenção é agora uma atividade estratégica, sendo os seus resultados incorporados em melhorias de design dos produtos e das operações, havendo maior ligação das organizações aos fornecedores e aos clientes. Deste modo, a manutenção passou de uma subfunção inevitável, a uma função estratégica fundamental para atingir os objetivos, em que os recursos são corretamente alocados e as ações são planeadas e bem definidas (Jardine *et al.*, 2006; Kobbacy *and* Murthy, 2008).

A Figura 14 ilustra sumariamente esta evolução (Kobbacy *and* Murthy, 2008). Juntamente com a evolução do conceito de Manutenção, deu-se a evolução da adoção das diferentes estratégias de Manutenção.



Figura 14 - Evolução cronológica da função de manutenção (Kobbacy *and* Murthy, 2008)

Moubray (1992), divide a evolução da Manutenção em gerações. A primeira geração corresponde à Manutenção Corretiva, que ocorreu entre a década de 40 e de 50, onde apenas se reparava quando o equipamento já tinha falhado. Na segunda geração, já entre a década de 50 a 70, introduziu-se a manutenção pré-determinada, com planeamento e controlo das atividades. Na terceira geração, que termina no ano 2000, o autor atribuiu a monitorização da condição, pois os computadores nessa época tornaram-se mais pequenos e mais rápidos, sendo aplicadas mais ferramentas de análise e controlo, e o *design* dos produtos procurava maior fiabilidade. Esta evolução está resumida na Figura 15.

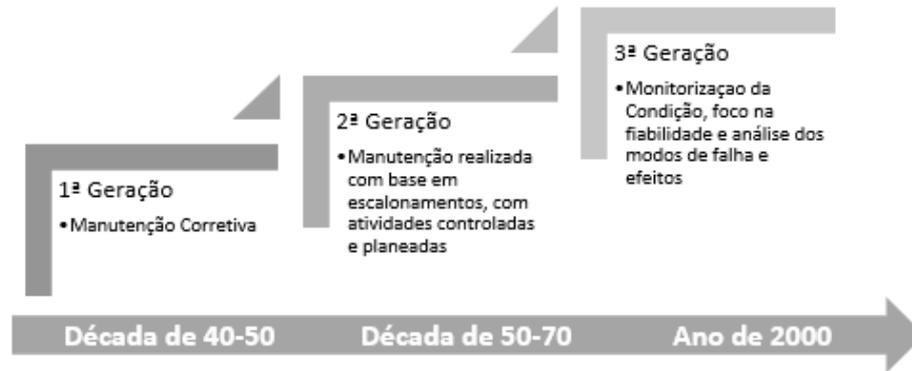


Figura 15 - Gerações da manutenção (Moubray, 1992)

Existem ainda organizações que utilizam a Manutenção Corretiva, pois esta, a curto prazo, parece ser a opção mais económica, mas a longo prazo, paragens não planeadas com falhas catastróficas poderão acontecer, resultando em maiores custos e maior indisponibilidade dos equipamentos. Deste modo, as organizações devem ter em conta os avanços tecnológicos e da manutenção que estão a ocorrer, pois poderão ser uma fonte de vantagem competitiva (Kobbacy and Murthy, 2008).

O surgimento de sistemas de manutenção computadorizados veio auxiliar na quantificação da eficiência desta atividade, que é fundamental para fornecer indicadores do processo e das máquinas, como a disponibilidade, fiabilidade, tempo entre paragens, tempo de reparação, entre outros indicadores. Só assim é possível ter conhecimento se a escolha e aplicação do método de manutenção forem adequadas ou não (Arslankaya and Atay, 2015).

Surgiram também na Indústria novas técnicas produtivas como o *Lean*, *Just-in-time* (JIT) e a Gestão da qualidade total (*Total quality management* - TQM), como forma de reduzir tudo o que não adiciona valor ao processo de produção, com o objetivo, também, de aumentar a fiabilidade e disponibilidade, e a vantagem competitiva da organização (Kobbacy and Murthy, 2008).

Com todas estas evoluções, o gestor de manutenção enfrenta desafios constantes para otimizar e atingir os objetivos dos clientes, cada vez mais exigentes. Algumas organizações optaram pelo *outsourcing* da função de manutenção, devido a esta complexidade das instalações fabris e da exigência crescente por parte dos clientes (Kobbacy and Murthy, 2008).

2.1.4 MANUTENÇÃO EM SISTEMAS INDÚSTRIA 4.0

Numa unidade industrial, a aplicação de uma técnica de manutenção preditiva é uma mais valia. Esta técnica utiliza por diversas vezes dispositivos como sensores para deteção das falhas, as quais, de outra forma não são perceptíveis. Com o aparecimento da quarta revolução Industrial, Indústria 4.0, existe a possibilidade de acrescentar dispositivos mais sofisticados, inteligentes e com maior valor, tornando a CBM uma técnica mais eficiente (Kiangala *and* Wang, 2018).

Conceitos que estão a ser introduzidos com a Quarta Revolução Industrial são, por exemplo, a *Cloud*, o *Big Data*, a *Internet of Things* e o *Machine Learning*, que poderão ser utilizadas para que de uma forma mais eficaz e autónoma se detetem as falhas, envolvendo cada vez menos os seres humanos nesta ação (Martínez, n.d.). Martínez (n.d.) e Paolanti *et al.* (2018) enfatizam a utilização relevante do *Machine Learning* na CBM, onde as máquinas serão capazes de autonomamente detetar diferenças entre a sua operação normal e anómala.

Existem também outras tecnologias, como sensores sem fio e *softwares* que fazem automaticamente a filtragem, análise e processamentos dos dados em tempo real, dando alertas conforme os limites estabelecidos. Estes alertas são enviados depois aos colaboradores adequados, mas ao mesmo tempo estão disponíveis em qualquer altura e local. Estes *softwares* são muitas vezes personalizáveis e, por isso, capazes de se adaptarem às necessidades de cada organização (Kiangala *and* Wang, 2018).

Um dos principais problemas da implementação da CBM, é recolher a quantidade suficiente de dados, o que requer algum tempo. Daí, a importância da evolução tecnológica como forma de colmatar esta desvantagem (Kiangala *and* Wang, 2018).

2.2 INDÚSTRIA 4.0

As mudanças que foram acontecendo ao longo dos anos na indústria, foram proporcionadas pela evolução tecnológica. Foi esta evolução que permitiu às organizações adquirirem ferramentas para aperfeiçoar a sua estratégia de manutenção, tentando alcançar assim a excelência e a vantagem competitiva necessária ao seu sucesso (Nerella *and* Rao, 2018).

A primeira revolução industrial deu-se com a mecanização da produção, que surgiu com a invenção do motor a vapor. A segunda, por sua vez, deveu-se com a produção em massa, substituindo-se o vapor por energia química e elétrica. Por sua vez, a terceira revolução trouxe a digitalização às organizações, permitindo aumento da produtividade, linhas de fabrico automatizadas e o uso da eletrónica. Atualmente, o setor industrial

está perante a quarta revolução, designada também por Indústria 4.0 (Kiangala *and* Wang, 2018; Pereira *and* Romero, 2017). A Figura 16 mostra a relação entre as revoluções industriais e o nível de complexidade tanto dos sistemas produtivos, como das tecnologias usadas (Vaidya *et al.*, 2018).

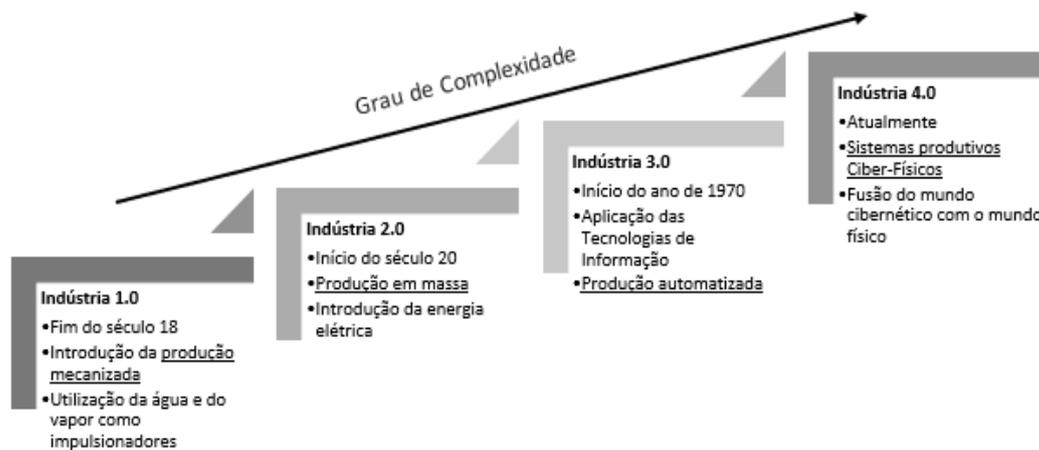


Figura 16 - Evolução da Indústria 4.0 (Vaidya *et al.*, 2018)

Segundo Thames *and* Schaefer (2016), esta revolução industrial impulsionará um crescimento da produtividade e da eficiência operacional, fazendo surgir processos produtivos inovadores, graças à colaboração entre máquinas. Este novo paradigma da Indústria também permitirá que a manutenção evolua, através, por exemplo, de sensores com grande capacidade de armazenamento e processamento de dados, que possam facilmente ser acedidos por qualquer pessoa em qualquer lugar (Ahuett-Garza *and* Kurfess, 2018). Os resultados esperados da aplicação desta Era são a melhoria dos produtos e serviços, redução de custos, maior qualidade, menor tempo de entrega e aumento da produtividade, conferindo vantagem competitiva (Chhetri *et al.*, 2017).

A título de exemplo, Barbosa *et al.* (2018) desenvolveram uma célula personalizável, que pode ser conectada a um ou dois centros de maquinagem, e que permite alimentá-las automaticamente, com recurso a sensores, atuadores e/ou braços robóticos, reduzindo a mão-de-obra humana nas atividades de carga e descarga. Desta forma, foi desenvolvido um sistema que permitirá que as PME (Pequenas e médias empresas) possam evoluir e passar da terceira para a quarta geração da indústria (Industry 4.0). Por outro lado, Pinto *et al.* (2019) criaram um modelo que foi posteriormente, implementado na indústria automóvel, onde os autores criaram um sistema de controlo produtivo baseado em automação e informação, que permite conhecer a condição do produto em tempo real, acionando todo o processo de logística e posterior processamento de forma totalmente automática.

Uma vantagem clara desta revolução relativamente às anteriores, é a sua previsão. Tal facto permite que as organizações definam objetivos, necessidades e tomem ações para

a implementar eficazmente (Pereira *and* Romero, 2017). Segundo um estudo feito, estima-se que cerca de 85% das organizações implementem as tecnologias da Indústria 4.0 nos próximos tempos. Para aqueles que já a implementaram, prevê-se que lucrem mais 30%, e que reduzam os seus custos em igual proporção (Chhetri *et al.*, 2017). Estas organizações que precocemente empregaram a Indústria 4.0, têm uma clara vantagem sobre os outros, pois já se encontram a lucrar mais e a reduzir mais custos, fazendo com que cada vez mais invistam e ganhem, sempre a funcionar neste ciclo, distanciando-se dos seus concorrentes, alcançando novos clientes e novos mercados (Geissbauer *and* Schrauf, 2016).

Para se implementar a Indústria 4.0, Geissbauer *and* Schrauf (2016) propõe que se sigam os seguintes passos:

- Definição clara de metas e objetivos a atingir, avaliar a situação atual da organização e o interesse futuro;
- Implementar projetos piloto para validação da conceção feita;
- Avaliar os recursos existentes e definir os futuros, de acordo com o conhecimento dos dois passos anteriores;
- Formação adequada em análise de dados, visto ser uma tecnologia essencial para a implementação;
- Adotar técnicas de forma a digitalizar os vários processos da organização;
- Utilizar todos estes recursos para projetar novos produtos e serviços adequados aos clientes, ou utilizar parcerias para o fazer.

Contudo, é preciso também ter em conta os desafios que a sua implementação irá trazer, nomeadamente a nível de segurança, e na fase inicial de investimento, que muitas vezes não pode ser suportada pelas PMEs, fazendo com que as empresas de maiores dimensões consigam evoluir e adquirir vantagem mais rapidamente (Vaidya *et al.*, 2018).

2.2.1 CONCEITOS

A Indústria 4.0 envolve a incorporação no sistema produtivo de diversas ferramentas/metodologias. Os quatro impulsionadores desta nova revolução foram a Internet das Coisas, a Internet das Coisas Industrial, a produção baseada em *Cloud* e a Produção Inteligente (Vaidya *et al.*, 2018).

As tecnologias emergentes levarão a que as produções, que são atualmente isoladas, se tornem integradas, automatizadas e otimizadas na sua totalidade, ao longo de toda a cadeia de valor (Vaidya *et al.*, 2018). As principais tecnologias estão presentes na Figura 17 (Chhetri *et al.*, 2017).



Figura 17 - Conceitos associados à Indústria 4.0 (Chhetri *et al.*, 2017)

De seguida, são definidos os principais conceitos.

- Sistemas ciber físicos (CPS): contempla a conexão entre o mundo físico, real, e o ciberespaço, ou seja, os sistemas computacionais. Caracteriza-se pela autonomia e descentralização do processo produtivo, através da troca de dados com o auxílio da *Cloud*, controlando as várias áreas de produção, através de métodos estatísticos e modelagem computacional, de modo a que se tomem decisões em tempo real. Os CPS permitem uma produção inteligente. Permitirá a integração dos sistemas e ligação entre toda a cadeia de abastecimento (Ahuett-Garza *and* Kurfess, 2018; Martinho *et al.*, 2017; Vaidya *et al.*, 2018);
- Sensores inteligentes: bastante uteis em técnicas CBM, pois são capazes de medir e processar mais rapidamente sinais. permitirão que as organizações consigam ter informação em tempo real da condição da totalidade dos seus ativos, pois estes facilitam a fusão de sensores (Chhetri *et al.*, 2017);
- Robôs: têm a característica de executarem tarefas de forma mais precisa e mais rápida, são capazes de realizar tarefas que os humanos não conseguem, ou que não são seguras para eles, sendo, por isso, bastante flexíveis e versáteis. No futuro, o objetivo é que estejam lado a lado com os operadores, a aprender com eles e com os erros, tornando-se assim mais autónomos (Chhetri *et al.*, 2017; Vaidya *et al.*, 2018). A robótica permitirá eliminar o trabalho manual, e substituí-lo pelo trabalho especializado, sendo este focado noutras vertentes, com foco principal nas tecnologias (Martinho *et al.*, 2017);
- Integração de sistemas: para se obter descentralização, flexibilidade e visibilidade da cadeia produtiva, é necessária a integração dos sistemas

horizontal, vertical e digitalmente, para que exista comunicação e interação entre máquinas, entre máquinas e pessoas e entre pessoas (Chhetri *et al.*, 2017; Vaidya *et al.*, 2018). A integração horizontal representa a conexão dos vários processos, recursos, fluxos e tecnologias de informação, enquanto a integração vertical e digital contempla a integração destes elementos com os departamentos e níveis hierárquicos (Pereira *and* Romero, 2017);

- Realidade aumentada: será uma ferramenta útil na manutenção, fornecendo em tempo real as instruções de manutenção, permitindo visualizar o interior dos equipamentos virtualmente, auxiliando na tarefa de tomada de decisão e no diagnóstico. Pode ser também aplicada em armazéns como forma mais rápida de localizar materiais, auxiliando na sua identificação, ou ser utilizada na produção para os operadores verem as instruções de trabalho de forma mais expedita. É uma tecnologia que pode ser amplamente utilizada e alargada a todas, ou quase todas, as áreas produtivas (Martinho *et al.*, 2017; Vaidya *et al.*, 2018);
- Análise de *Big Data*: consiste na análise de dados em grande quantidade e variedade. Com a aplicação das tecnologias emergentes com a Indústria 4.0, serão gerados cada vez mais dados, que são provenientes de sensores ou outros tipos de equipamentos inteligentes em tempo real, dos diversos ativos da organização e que, por isso, têm as mais diversas informações. A análise a estes dados é essencial para descobrir problemas, padrões, retirar parâmetros ou outras informações das máquinas, sendo útil no *Machine Learning*, por exemplo (Ahuett-Garza *and* Kurfess, 2018; Chhetri *et al.*, 2017; Vaidya *et al.*, 2018);
- Aprendizagem de Máquinas (*Machine Learning*): os algoritmos e ferramentas de aprendizagem para as máquinas é agora aplicado, devido à quantidade de dados recolhidos dos processos produtivos que podem ser utilizados para análise destes, de forma a construir um sistema de manufatura inteligente, ou seja, a partir dos dados extrai-se o conhecimento necessário para a tomada de decisão. Para isto, são necessárias duas fases, uma em que existe um treino das máquinas, e depois a conclusão acerca da aprendizagem feita. É uma ferramenta útil na monitorização da condição, de forma autónoma por parte das máquinas (Ahuett-Garza *and* Kurfess, 2018; Chhetri *et al.*, 2017);
- Comunicação Máquina para Máquina: permitirá que sem a interação dos humanos, as máquinas comuniquem autonomamente entre si, nomeadamente para deteção, processamento e atuação, ou seja, será uma tecnologia fundamental para a Manutenção. Deste modo, os equipamentos de deteção não necessitarão de ser tão complexos, tornando-se mais económicos. Outra vantagem será a inclusão de máquinas em locais inacessíveis pelos humanos (Amodu *and* Othman, 2018);
- Nuvem (*Cloud*): com a evolução das tecnologias e conectividades estabelecidas, existirá uma grande quantidade de dados a serem gerados, que necessitarão de estar acessíveis em qualquer lugar, por qualquer pessoa, daí a importância da *Cloud* (Chhetri *et al.*, 2017). Outro conceito relacionado é a fabricação em nuvem, que consiste numa produção em rede de forma ciber física e

reconfigurável, permitindo assim alocar recursos de acordo com a procura. Esta produção tem como objetivo ser mais eficiente, flexível e económica (Martinho *et al.*, 2017; Thames *and* Schaefer, 2016);

- Manufatura Aditiva: consistem na prototipagem ou fabricação unitária, ou em lotes muito reduzidos de peças, que podem ter elevada complexidade. Desta forma, e como os equipamentos utilizados são de pequena dimensão, é possível fabricar de forma flexível e descentralizada. No entanto, alguns produtos poderão necessitar de algum tipo de operação de acabamento. Hoje em dia, os seus principais desafios são o tempo de fabrico, a quantidade de produção e as características dos materiais disponíveis para produção (Ahuett-Garza *and* Kurfess, 2018; Chhetri *et al.*, 2017). Por outro lado, custos de transporte e *stocks* são evitados, podendo-se estabelecer uma organização em qualquer lugar a fabricar todo o tipo de peças, de forma personalizável (Geissbauer *and* Schrauf, 2016; Vaidya *et al.*, 2018);
- *Internet* das Coisas (*Internet of things* - IoT): Quando os CPS se conectam à *Internet*, são referidos como “*Internet das Coisas*”. Deste modo, a IoT é uma rede de objetos conectados entre si e que comunicam uns com os outros, recolhendo e trocando dados, com recurso à *Internet*. As suas principais vantagens são: a interação avançada com um ambiente real, que permite uma mudança em tempo real caso de detete uma anomalia, fornece dados de um ativo, como localização e condição física, e permite que se otimize todo o processo produtivo (Pereira *and* Romero, 2017; Vaidya *et al.*, 2018). Outro termo que advém deste e que emergiu com a Indústria 4.0, foi a *Internet das Coisas Industrial* (*Industrial Internet of things* - IIoT), ou seja, é a IoT, mas com aplicação direta nos sistemas industriais, como a recolha de dados através de sensores, robôs, máquinas CNC, entre outros equipamentos utilizados diariamente no ambiente industrial, e não no âmbito geral, como a IoT (Thames *and* Schaefer, 2016).

Além destes conceitos, existem outros associados a esta nova revolução. A ciber segurança é um deles. Os Sistemas de Informação (SI) necessitam de ser seguros e robustos, para permitir a eficácia desta nova era. Qualquer problema de comunicação em toda esta rede interconectada pode provocar paragens produtivas, causando indisponibilidade das máquinas, o que constitui um grande custo para a organização. Além disso, qualquer fuga de informação da rede, pode comprometer a segurança dos dados da organização e dos seus clientes, revelando dados confidenciais, como conhecimentos especializados acerca do processo produtivo, dados dos clientes, entre outros (Martinho *et al.*, 2017). Para Chhetri *et al.* (2017), com a evolução das tecnologias e a ligação destas com a *Internet*, três requisitos de segurança são essenciais:

- Confidencialidade: devem ser incorporados, nestes sistemas em rede, técnicas para assegurar que não exista a possibilidade de fuga da informação, como sistemas de encriptação e controlo para quem acede à *Cloud*;
- Integridade: contempla consistência, precisão e fiabilidade da informação circula na rede, e consistência e fiabilidade dos componentes físicos ao longo do seu ciclo de vida;

- Disponibilidade: como abordado, paragens produtivas são de evitar, e estas podem ser provenientes de ataques cibernéticos. O autor propõe uma arquitetura distribuída para mitigação da indisponibilidade, no caso de uma falha do sistema.

O conceito de *Smart Factory*, Fábrica Inteligente, também é abordado na literatura. Este conceito consiste na aplicação das tecnologias emergentes da Indústria 4.0 a uma organização, de forma a que exista total conexão, digitalização, integração e comunicação entre toda a sua cadeia de valor. Ao longo desta, existem Produtos Inteligentes, que têm todas as características de uma Fábrica Inteligente, mas aplicada ao produto em si, sendo que estes controlam autonomamente os processos produtivos, fornecem informações do seu estado e interagem com o ambiente real ao longo de todo o seu ciclo de vida, e não apenas no ambiente fabril. Os modelos de negócio, com toda esta mudança, estão também a sofrer alterações, sendo o ponto chave a integração dos clientes de forma ativa na rede, na qual está interligada toda a cadeia de valor. Deste modo, os clientes podem monitorizar os seus produtos e, inclusive, mudar os seus requisitos em tempo real (Pereira *and* Romero, 2017).

2.2.2 ARQUITETURA DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

A definição de uma Arquitetura dos Sistemas de Informação (ASI) é essencial para se alcançar o apoio necessário por parte das tecnologias. O seu objetivo primordial é a representação da organização, das relações, dos princípios e diretrizes dos elementos de sistemas de informação, como suporte ao negócio (Vasconcelos *et al*, n.d.). Desta forma, a ASI é diretamente dependente dos objetivos da empresa e âmbito de negócio. É muitas vezes um fator fundamental para que uma organização tenha êxito (Vasconcelos *et al*, 1998).

Esta definição da ASI traz inúmeras vantagens, tanto para a organização, como em particular para os SI. Deste modo, os seus principais pontos positivos são (Tait *et al.*, 2010; Vasconcelos *et al.*, 1998):

- Garante qualidade e flexibilidade dos SI, havendo depois uma resposta mais apropriada às exigências dos clientes;
- A comunicação que é feita entre os membros da organização é facilitada, pois os dados estão claros e interrelacionados adequadamente;
- Possibilidade de incorporar sistemas computadorizados e adicionar ferramentas e técnicas para desenvolver o *software*;
- Permite poupar tempo;
- Possibilita um equilíbrio entre inovação e eficiência da tecnologia, e requisitos e necessidades do negócio;
- Permite claramente vantagens competitivas.

Os Modelos de Arquitetura de Sistemas de Informação podem ser de vários tipos, de entre eles existem (Tait *et al.*, 2010):

- Estrutura de *Zachman*: o seu objetivo é a possibilidade de ver como o sistema funciona e se relaciona de diversas perspetivas;
- Modelo de *Gifford*: à atividade de negócios, é aplicada uma plataforma *hardware* apropriada;
- Arquitetura Aris: ARIS é um acrónimo para Arquitetura de Sistemas Integrados de Informação, ou seja, os SI são integrados e depois desenvolvidos, otimizados e convertidos em implementações técnicas de processamento eletrónico de dados;
- Arquitetura IFIP.WG: a estrutura implementada é composta por perspetivas e níveis de ciclo de vida de um SI;
- Arquitetura CIM-OSA: O seu objetivo é conceder uma arquitetura de sistema aberto, que seja capaz de incorporar as necessidades de informação interna e externa, de fornecer suporte a todos os níveis de gestão e apoio aos processos de tomada de decisão, fornecendo a informação necessária.

2.3 SENSORIZAÇÃO

Para implementar a estratégia de CBM, existe a necessidade de utilizar equipamentos como sensores para que estes possam recolher, analisar e interpretar dados de equipamentos críticos de uma empresa (Kiangala *and* Wang, 2018).

Para se implementar uma CBM, são necessárias as seguintes etapas (Dhami *et al.*, 2018; Jardine *et al.*, 2006):

- Aquisição de dados;
- Processamento de dados;
- Tomada de decisão:
 - Diagnóstico;
 - Prognóstico.

2.3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

A etapa de aquisição de sinais tem como principal objetivo fazer a medição de uma ou mais grandezas físicas de um certo componente ou sistema, com o objetivo de recolher dados.

Esta medição que é realizada, é subdividida na literatura em direta e indireta. Começando pela medição direta, a sua principal vantagem é a precisão, porém, muitas vezes não é possível aplicá-la num ambiente industrial, tanto devido a problemas de acessibilidade, ou devido à utilização de fluidos como é o caso do óleo lubrificante na maquinagem CNC. Técnicas indiretas são, por exemplo, inspeção visual com recurso a câmaras e raios laser. As medições indiretas são as mais utilizadas, devido à sua facilidade de utilização e colocação no ambiente fabril, pois muitas delas têm reduzidas dimensões e/ou resistem a altas temperaturas e a fluídos. Contudo, ao contrário das medições diretas, estas não têm tanta precisão (Kovač *and* Mankova, 2011).

No anexo 1 pode observar-se um excerto da norma ISO 17359:2002 no qual são apresentados os exemplos de parâmetros de monitorização da condição por tipologia de máquina. Segundo esta norma, os parâmetros possíveis de serem utilizados para manutenção preditiva de motores elétricos são a temperatura, corrente, vibração, emissões acústicas, entre outras (ISO 17359,2002). Esta norma tem como desvantagem a generalização dos equipamentos aos quais os parâmetros se aplicam e a falta de uma ordem de eficácia de entre os parâmetros possíveis. A ISO 230:2012, por sua vez, é mais específica na medida em que estabelece a vibração para monitorização das máquinas ferramenta, ou seja, estabelece um só parâmetro para um tipo de máquina mais específico (Rastegari, 2019). Na literatura também se encontram diferentes opiniões relativamente aos parâmetros de maior eficácia.

Segundo Zhou *et al.* (2007), os métodos mais utilizados para monitorizar os rolamentos são a vibração, a análise química, a temperatura, as emissões acústicas, a pressão sonora, o laser e a corrente. Começando pela vibração, apesar de esta ser eficaz devido à assinatura característica de cada falha na máquina, e de ser um método não destrutivo, tem como desvantagens os altos custos, o facto de que o equipamento de medição tem de estar acoplado no interior da máquina, a necessidade na fase inicial de uma pessoa especializada, e a falha inerente aos próprios dispositivos, pois por norma os rolamentos têm elevado Tempo médio até à falha (MTTF), fazendo com que os equipamentos de medição tenham que ter um valor superior. A análise química aplica-se ao óleo lubrificante que contém, além dos detritos, as partículas provenientes da degradação dos rolamentos, e, segundo o autor, apenas é eficazmente aplicada a máquinas com potência acima de 50 kW. A temperatura, por sua vez, utiliza normas ou referências de fornecedores para estabelecer limites, e assim perceber a condição da máquina. No entanto, o valor obtido nas medições nada indica acerca do motivo de alteração do valor, sendo por isso pouco utilizada atualmente. As emissões acústicas competem muitas vezes com a análise por vibração, sendo que as primeiras têm melhor relação sinal ruído, mas maiores custos de implementação. A medição da pressão sonora, apesar de ser bastante eficaz, é influenciada pelo ruído envolvente. Deste modo, não é recomendada para instalações fabris em que este tem níveis elevados, pois podem comprometer a medição, exigindo assim técnicas para os filtrar. A medição laser da vibração pode ser bastante eficaz, contudo os equipamentos de medição têm de ser instalados na superfície dos rolamentos, o que muitas vezes não é possível. Por último, a medição da corrente é bastante vantajosa, não necessitando da aplicação de

equipamentos extra e permite estimar velocidades e eficiências da máquina. Por outro lado, para monitorizar rolamentos ainda não é muito aplicada, devido à falta de informação acerca do seu sucesso na análise deste componente e, muitas vezes, os sinais recolhidos são afetados por outros componentes.

Na literatura, encontra-se frequentemente a vibração como o parâmetro mais utilizado e eficaz para análise de rolamentos, por exemplo, segundo (Choudhury *and* Tandon, 2000; Karabay *and* Uzman, 2009; Rastegari *et al.*, 2017; Shakya, Darpe, *and* Kulkarni, 2013; Vanraj *et al.*, 2016). Shakya *et al.* (2013) defendem que esta escolha é suportada pela facilidade da sua medição. Sabe-se que uma máquina em operação normal possui determinado padrão de vibração, que se altera com o crescimento de falhas (Chaudhury *et al.*, 2014; Rastegari *et al.*, 2017; Rastegari, 2019;).

Porém, segundo Nerella *and* Rao (2018), a vibração é um método adequado para monitorização dos rolamentos, mas é ineficaz na deteção de defeitos na fase inicial, só os detetando quando estes atingem a superfície. Deste modo, propõe a análise de emissões acústicas (EA) como técnica complementar, pois esta apresenta grande sensibilidade a defeitos incipientes.

A justificação para esta diferença no método de monitorização deve-se ao facto de que, por norma, os instrumentos de medição da vibração só captam sinais abaixo de uma frequência de 20 kHz, alguns abaixo de 50 kHz, ou seja, problemas a baixa frequência, como é o caso dos danos graves nos rolamentos. As EA, por sua vez, deteta sinais entre 100 kHz a 1 MHz de frequência, não existindo qualquer interferência dos problemas a baixa frequência, e danos na fase inicial dos rolamentos podem assim ser facilmente detetados, inclusive a indicação do tamanho do defeito pode ser feita (Morhain *and* Mba, 2003; Nerella *and* Rao, 2018).

Tal como referido anteriormente, as EA também apresentam desvantagens em relação à vibração, como a complexidade do processamento dos sinais, interpretação e sua classificação, e o elevado ruído no chão de fábrica que pode comprometer a medição, sendo que já foram aplicadas com sucesso técnicas para eliminar esses ruídos indesejáveis (Freitas *et al.*, 2016; Morhain *and* Mba, 2003).

Contrariamente ao que os autores referidos anteriormente afirmaram, como Nerella *and* Rao (2018), de acordo com Scheffer *and* Girdhar (2004), a monitorização das vibrações no caso das máquinas rotativas é o parâmetro mais eficaz.

A ISO 230: 2012 enuncia os efeitos indesejáveis da vibração nas máquinas ferramenta, como a má qualidade de acabamento devido a um corte impreciso, as ferramentas veem a sua vida útil reduzida, tal como outros componentes da máquina, e é ainda produzido um nível de ruído que se torna desagradável para os operadores (ISO 230, 2012).

Após a seleção dos parâmetros de monitorização e sua medição, é necessário recolher e armazenar os dados.

Para o caso da análise de vibração é necessário (Scheffer *and* Girdhar, 2004):

- Um captador de sinais - transdutor;
- Um sistema de recolha de dados, condicionamento e filtragem destes;
- Um *software* de análise;
- Um computador para analisar e guardar os dados recolhidos.

Na monitorização da vibração, as amplitudes que são possíveis de serem utilizadas são: deslocamento, velocidade e aceleração, normalmente designadas por amplitudes. Assim sendo, por norma, quanto maior a amplitude da vibração, maior o nível dos defeitos. A relação que se estabelece entre estes três parâmetros pode observar-se na Figura 18 (Dinardo *et al.*, 2018).

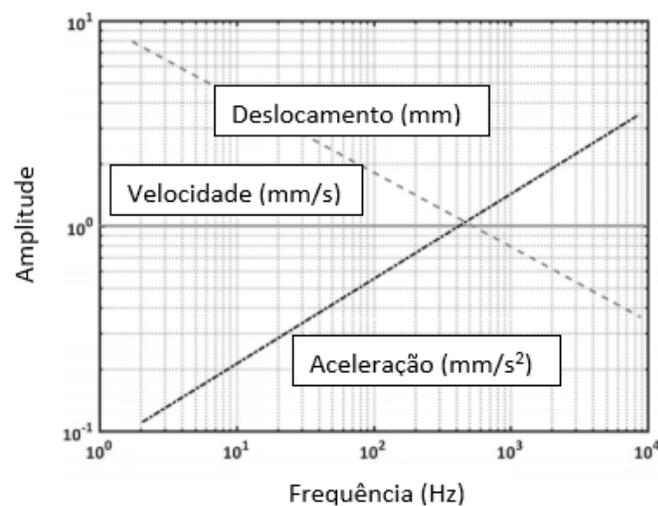


Figura 18 - Relação entre a frequência de resposta e a amplitude (Dinardo *et al.*, 2018)

Deste modo (Dinardo *et al.*, 2018):

- Abaixo de 10 Hz - muito pouca vibração em termos de aceleração, vibração moderada em termos de velocidade e vibrações relativamente grandes em termos de deslocamento;
- Entre 10 Hz e 1000 Hz - a velocidade dá uma boa indicação da severidade da vibração;
- Acima de 1000 Hz - valores de aceleração mais significativos que a velocidade ou o deslocamento.

Para a monitorização das amplitudes de vibração utiliza-se por norma um transdutor, o qual é responsável por converter uma quantidade física em sinais elétricos, sendo a sua seleção relevante, pois a sua *performance* influencia diretamente os resultados da análise (Mechefske, 2010). Os transdutores podem ser de três tipos:

- sem contacto, também designados por transdutores de proximidade ou de deslocamento, que tal como o nome indica, medem o deslocamento. O transdutor de proximidade mais utilizado é o de *Eddy Current*. Este baseia-se no princípio em que um sinal de alta frequência é gerado por um oscilador, criando um campo magnético. Este campo magnético gera correntes que se propagam e, ao atingirem o objeto pretendido, geram um campo magnético oposto, diretamente proporcional à distância entre este e o sensor (Abbass, n.d.; Scheffer *and* Girdhar, 2004);
- transdutores de velocidade, que podem medir a velocidade e o deslocamento: funcionam com um íman permanente, que é suportado por molas, sendo que este se move dentro de uma bobina. Quando existe vibração, o íman movimentase, induzindo corrente na bobina. As suas principais vantagens são: não necessita de condicionamento de sinal e tem boa sensibilidade (acima de 10 Hz). Como desvantagem, tem uma limitada resposta de alta frequência. (Mechefske, 2010);
- transdutores de aceleração, ou acelerómetros, que podem medir as três variáveis, deslocamento, velocidade e aceleração. Os acelerómetros podem ser de diversos tipos. Os acelerómetros tradicionais, piezoelétricos, capacitivos e indutivos, têm a desvantagem de terem maior custo, quando comparados com os recentemente utilizados acelerómetros MEMS (sistemas micro eletromecânicos) (Albarbar, Mekid, Starr, *and* Pietruszkiewicz, 2008). Deste modo, os transdutores de aceleração mais comuns são (Chaudhury *et al.*, 2014):
 - Piezoelétricos: consistem num cristal piezoelétrico e numa massa. Essa massa, ao ser submetida a aceleração, exerce uma força no cristal piezoelétrico, sendo esta diretamente proporcional à aceleração vibratória (Scheffer *and* Girdhar, 2004). As suas principais vantagens são: pouco ruído de saída e extensa faixa de medição dinâmica e de frequência (Lu, 2018);
 - Piezorresistivos MEMS: consistem numa massa que está suspensa por uma mola, sendo que esta massa oscila quando sujeita a vibração. A boa sensibilidade é uma das suas principais características (Albarbar *et al.*, 2008);
 - Capacitivos MEMS: a vibração provoca uma mudança na capacitância entre a massa e um eletrodo condutivo que está imóvel (Albarbar *et al.*, 2008). São vantajosos, pois não necessitam de grandes técnicas de processamento, não variam com as alterações na temperatura, têm excelente sensibilidade, e baixo custo. Estes são capazes de fazer medições de vibração quase-estática e estática (Lu *et al.*, 2018).

Os acelerómetros são os mais utilizados na manutenção com base na condição (Mechefske, 2010; Rastegari, 2019; Scheffer *and* Girdhar, 2004). Eles têm uma larga banda de frequência de resposta, têm baixo peso, são compactos e robustos. Máquinas com componentes como rolamentos ou engrenagens, devem ser monitorizados com estes transdutores (Scheffer *and* Girdhar, 2004).

Segundo Lu *et al.* (2018) e Albarbar *et al.* (2008), de entre os acelerômetros anteriormente descritos, os dois tipos mais comuns são os piezoelétricos e os capacitivos MEMS. Na Tabela 2 encontram-se as suas principais vantagens e desvantagens, segundo estes autores.

Tabela 2 - Diferenças entre os sensores piezoelétricos e os capacitivos MEMS (Lu *et al.* 2018; Albarbar *et al.*, 2008)

TIPO DE ACELERÓMETRO	PIEZOELÉTRICO	CAPACITIVO MEMS
VANTAGENS	Baixos níveis de ruído	Reduzida dimensão e peso
	Banda de frequência útil de 0,25 Hz a 20 kHz	Excelente sensibilidade
	Elevado intervalo dinâmico	Desempenho nas baixas frequências
	Compacto e de variadas dimensões	Baixo custo (<10% acelerómetro piezoelétrico)
	Resistente	Condicionamento e aquisição de sinal integrado no sensor
	-	Integração com outros sensores
DESVANTAGENS	Elevado custo	Frequência máxima não tão elevada

Após a seleção do tipo de acelerómetro a utilizar, é necessário escolher, dentro dos modelos disponíveis, aquele que melhor se adequa ao sistema que se irá analisar. Deste modo, segundo Albarbar *et al.* (2008), para esta seleção é necessário ter em atenção as seguintes grandezas:

- Sensibilidade: rácio entre o sinal elétrico de saída e o sinal vibratório de entrada. Na Figura 19 pode observar-se a relação existente entre a sensibilidade e a frequência, sendo que para altas amplitudes utiliza-se um transdutor com baixa frequência, e vice-versa [1];
- Limite de amplitude: amplitude máxima medida pelo acelerómetro;
- Limite de choque: aceleração máxima suportada pelo acelerómetro sem provocar danos ao sistema;
- Frequência natural: faixa útil em que mede a vibração;
- Resolução: menor amplitude de vibração detetada;
- Faixa de frequência: faixa na qual o acelerómetro pode medir;
- Mudança de fase: tempo de atraso entre a entrada da vibração e a saída elétrica.

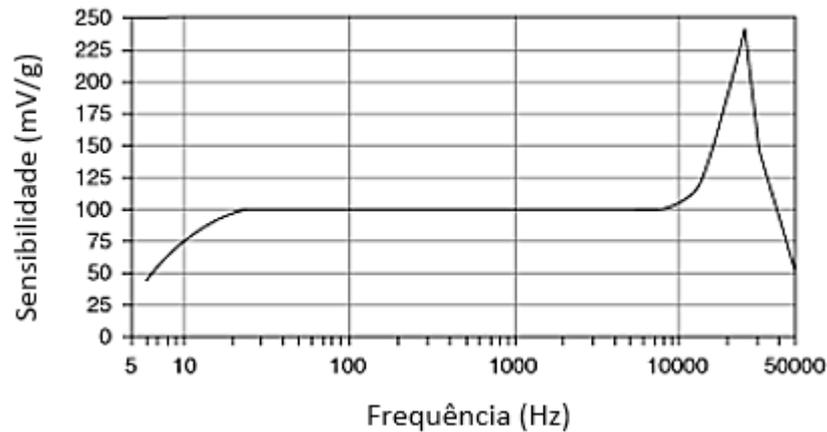


Figura 19 - Relação entre a sensibilidade e a frequência de um acelerômetro [1]

É necessário também definir-se onde se irão colocar os sensores. Quanto à localização, não existe um único local ótimo para se medir todos os tipos de vibração, e, por isso, é relevante a necessidade de se conhecer as condições dos diferentes locais, a fim de se definir quais os mais eficazes. Mechefske (2010) defende a importância da seleção do local de posicionamento do sensor no que diz respeito à detecção dos defeitos dos rolamentos, uma vez que as frequências a eles associados são relativamente elevadas, recomendando várias localizações e direções de medição. Deste modo, segundo este autor, os sensores devem ser colocados o mais perto possível dos rolamentos.

Cao *et al.* (2012), por sua vez, testaram as diferentes localizações possíveis para um sensor, de modo a detetar um rolamento defeituoso num fuso de uma máquina-ferramenta através da análise de vibrações. As localizações que selecionaram estão representadas na Figura 20.

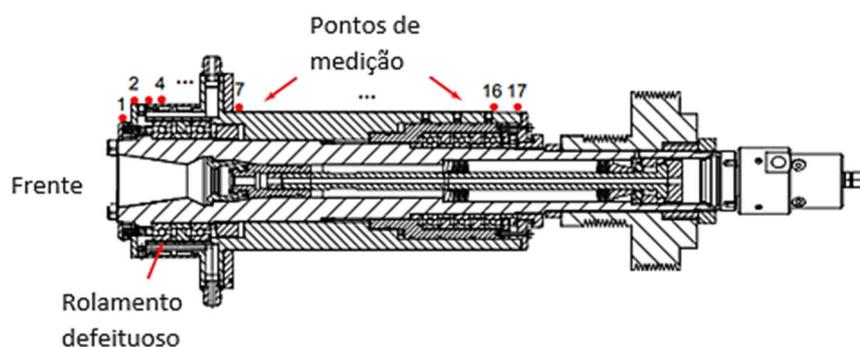


Figura 20 - Locais selecionados para estudo (Cao *et al.*, 2012)

De acordo com os seus resultados experimentais, Cao *et al.* (2012) obtiveram a maior amplitude da resposta de vibração no ponto 1, logo, segundo os autores, esta é a melhor posição para medir as respostas de vibração do primeiro rolamento, não sendo por isso o local mais próximo a este, ponto 4, a melhor solução, como defendia Mechefske (2010).

Cao *et al.* (2012) concluíram ainda que o incorreto posicionamento do sensor pode resultar no insucesso da deteção das falhas dos rolamentos.

O fornecedor de sensores PCB Piezotronics [2] recomenda também os pontos 1, 2 ou 4, estudados por Cao *et al.* (2012), para a monitorização dos fusos, como se pode ver na Figura 21.

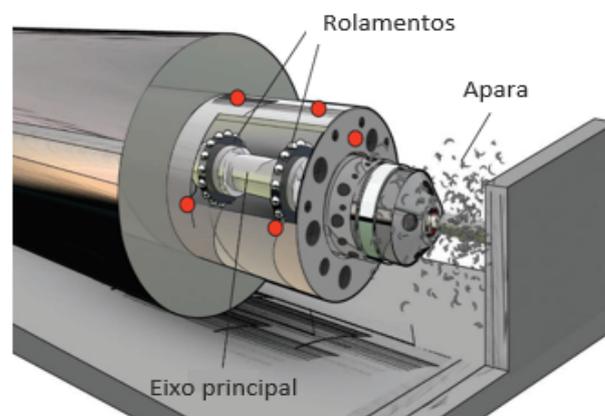


Figura 21 - Localizações propostas pela PCB Piezotronics [2]

Além da localização, é necessário também definir as direções de medição, o tipo de montagem, a velocidade de rotação do fuso na medição e as condições de medição, ou seja, em vazio ou durante a operação (Rastegari *et al.*, 2017).

Existem três tipos possíveis de direção de medição, axial, horizontal ou verticalmente. Segundo a SKF (2000), o ideal seria uma medição triaxial, quando possível. Se tal não for possível, segundo esta mesma marca, a direção horizontal é a que deteta mais vibrações, seguida da vertical e, por fim, a axial.

Existem diversos métodos possíveis para montagem dos sensores nas máquinas ou componentes destas. Os principais métodos utilizados são (Mechefske, 2010; Mobley, 2016; Scheffer *and* Girdhar, 2004):

- Montagem adesiva: o adesivo pode ser epóxi, cola ou cera. Quando o acelerómetro é colado, ele normalmente reduz a sua faixa de resposta de frequência operacional e, também, a precisão da medição. Esta redução deve-se às qualidades de amortecimento do adesivo. Além disso, a sua substituição ou remoção é mais trabalhosa do que com qualquer outro método de fixação. A

utilização da cera, em comparação com a cola, permite a remoção mais fácil do acelerômetro;

- Montagem magnética: O método de montagem magnética é normalmente usado para medições temporárias, não sendo recomendado para monitoramento permanente. O transdutor pode mover-se irrefletidamente e pode haver interferência do ímã com os sinais de alta frequência. Tem também como desvantagem a limitada sensibilidade a alta frequência, de 4 a 5 kHz (Mechefske, 2010);
- Montagem roscada/com pinos ou parafusos: segundo Mechefske (2010) este é o melhor método disponível para aplicações de montagem permanente. Para isso, o acelerômetro pode ser equipado com um pino permanente ou removível, dependendo do modelo, e deve ser ajustado com o binário de montagem específico, usando uma chave de binário. O local deve estar limpo, pois qualquer irregularidade na preparação da superfície de montagem pode traduzir-se em medições erradas, ou pode mesmo trazer danos para o próprio sensor. É um método caro.

Quanto à velocidade de rotação, segundo Rastegari *et al.* (2017), esta pode variar, ou ser constante, nunca excedendo, em qualquer um dos casos, a sua velocidade máxima. Para este autor, caso se decida variar a velocidade, deve existir um patamar de dez segundos em que a velocidade é mantida, e no caso da velocidade máxima ser entre 600 a 30000 rpm, que é o caso, devem ser excluídas as faixas das velocidades de ressonância, que podem ser obtidas a partir do fabricante, ou não devem ser mais do que 10% da faixa de velocidade nominal do eixo.

Segundo Rastegari *et al.* (2017), a monitorização não deve ser feita durante a produção, para o caso dos rolamentos do fuso num torno suíço, sendo assim periódica, defendendo também que as máquinas de baixa velocidade devem ser monitorizadas mensalmente e as máquinas de alta velocidade devem ser controladas diariamente, ou em contínuo. Também Karabay *and* Uzman (2009) afirmam que, por norma, a análise de vibrações é feita com uma periodicidade mensal, e comparada com as anteriores medições.

Relativamente às EA, Morhain *and* Mba (2003) define as emissões acústicas na sua investigação como “ondas elásticas transientes geradas pela interação de duas superfícies em movimento relativo”.

Para medição das emissões acústicas, utiliza-se frequentemente um transdutor piezoelétrico, que possui alta frequência natural e resposta ressonante, um pré-amplificador, que pode incluir um filtro para ser possível controlar a largura de banda do sinal, e um processador de sinais (Choudhury *and* Tandon, 2000).

Segundo Scheffer *and* Girdhar (2004), um aumento de 12 dB na aquisição de emissões acústicas, indica o começo de uma falha num rolamento, para rolamentos na faixa de frequência de 24 a 50 kHz.

2.3.2 PROCESSAMENTO DE DADOS

Antes da análise propriamente dita dos dados, estes precisam de ser filtrados. Por norma, os dados contêm erros, quer sejam devido a falhas de sensores, ou erros humanos em dados que tenham sido introduzidos manualmente. Esta fase é importante, para que depois a análise feita seja o mais fidedigna possível. Esta limpeza pode ser feita com recurso a gráficos, por exemplo (Jardine *et al.*, 2006).

De acordo com o tipo de dados que são recolhidos, é feita a escolha do algoritmo ou ferramenta mais adequada. Estes dados podem-se enquadrar em três tipologias (Jardine *et al.*, 2006):

- Valor: correspondem a uma quantidade única do parâmetro analisado, como temperatura, pressão, ou outro tipo de variável;
- Forma de onda: são os mais utilizados. Correspondem a dados recolhidos num período, e podem ser sinais de vibração ou ultrassónicos, por exemplo;
- Multidimensionais: também são recolhidos num período, mas correspondem a dados de imagem, como é o caso dos raios-X e termografias infravermelhas.

Esta fase vai recolher a informação útil para o diagnóstico e prognóstico (Jardine *et al.*, 2006).

Como os dados que serão recolhidos neste trabalho serão do tipo de forma de onda, só o seu processamento será descrito. O processamento de sinais que corresponde à análise do tipo de dados de forma de onda, ou multidimensionais, é bastante semelhante, sendo que para este último é um processo mais complexo (Jardine *et al.*, 2006).

Para processar sinais de forma de onda, existem fundamentalmente três técnicas (Jardine *et al.*, 2006):

- Análise no domínio do tempo: é a mais simples e contempla o cálculo de valores estatísticos como a média, o desvio padrão, a curtose, entre outros. Consoante a variável que se está a analisar, alguns parâmetros são mais adequados que outros. Esta análise, como será visto mais à frente, apenas permite detetar a existência ou não de um defeito;
- Análise no domínio da frequência: esta técnica tem a vantagem sobre a anterior de identificar e isolar determinadas frequências de interesse para localização do defeito. Correntemente, usa-se a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) para transformar os sinais no domínio do tempo para o da frequência. As análises posteriores podem ser de diferentes tipos, sendo, segundo Mechefske (2010), por exemplo:
 - Análise de passagem de banda: consiste na filtragem do sinal numa determinada banda de frequência, onde se espera obter as frequências características da falha. É uma técnica relativamente simples de aplicar.

Contudo, todas as frequências que não se enquadrem nesta banda não são observadas, podendo-se perder informação;

- Espectro de envelope: consiste na desmodulação de um sinal, ou seja, existe uma filtragem dos sinais resultantes de outras fontes que não queremos analisar, como ruído, ficando apenas as frequências da falha em análise. Estas frequências características, correspondem no espectro a alta frequência e curta duração. No processo de desmodulação, primeiro o sinal passa por um filtro passa-alta, que retira os sinais de grande amplitude, depois passa por um retificador e filtro passa-baixa, resultando apenas as frequências de interesse. Contudo, as bandas selecionadas para filtragem devem ser bem ponderadas;
- Espectro de assinatura: consiste na comparação do espectro de frequência obtido com o espectro recolhido, quando a condição da máquina era nova ou recentemente inspecionada. Assim, através de uma observação visual, ou através de técnicas de reconhecimento de padrões, é possível detetar falhas.
- Análise no domínio tempo-frequência: é a análise mais adequada para sinais de forma de onda não estacionários.

Relativamente à análise no domínio do tempo e da frequência para as vibrações, que são as técnicas mais correntemente utilizadas, devemos ter em conta que a primeira apenas deteta a presença ou não de um defeito, sendo por isso necessária a análise espectral (domínio da frequência) para um diagnóstico mais preciso, e assim ser possível localizar o defeito (De Castelbajac *et al.*, 2014; Dhami *et al.*, 2018).

2.3.2.1 ANÁLISE DO DOMÍNIO DO TEMPO

Os parâmetros estatísticos mais comuns para utilizar esta técnica para análise de Vibração e/ou Emissões Acústicas são: o Fator de Crista, a Curtose, a Assimetria, Contagens e o Nível global ou raiz do valor quadrático médio (*Root mean square* - RMS), entre outros (Mechefske, 2010; Road, 2014; Sandoval and Ramirez, 2013). Esta técnica tem a vantagem de que quase nenhum dado é perdido antes da análise, permitindo maior detalhe. Porém, este facto também acarreta que diversas vezes exista uma quantidade demasiado grande de dados, dificultando o seu diagnóstico (Mechefske, 2010).

Os seguintes parâmetros e limites, quando definidos, aplicam-se às duas análises: Vibração e Emissões Acústicas.

CURTOSE

A curtose descreve a forma da distribuição de uma determinada população no domínio do tempo. De maneira semelhante, é usado dentro da manutenção para descrever a

forma do sinal. A curtose, para um sinal, é definida como (Road, 2014; Sandoval *and* Ramirez, 2013):

$$Curtose = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (5)$$

Sendo:

- N - número total de pontos da amostra;
- x_i - valor do sinal num dado ponto i da amostra;
- i - Número da amostra;
- σ - desvio-padrão;
- μ - valor médio do sinal.

Este parâmetro é relevante em máquinas de baixa velocidade para detecção de defeitos precoces, porém, é sensível ao ruído (De Castelbajac *et al.*, 2014).

NÍVEL GLOBAL OU RMS

É um método de análise comparativo e é bastante simples. Ele permite calcular o valor da velocidade ou aceleração RMS, e comparar este valor obtido com tabelas de severidade que estabelecem limites de referência.

Este valor é dado por (Road, 2014; Sandoval *and* Ramirez, 2013):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (6)$$

Sendo:

- N - número total de pontos da amostra;
- x_i - valor do sinal num dado ponto i da amostra;
- i - Número da amostra;
- μ - valor médio do sinal.

VALOR DE PICO OU AMPLITUDE

O valor de pico do sinal é definido por Sandoval *and* Ramirez (2013) como:

$$Valor\ de\ Pico = \text{máximo}(x_i) \quad (7)$$

FATOR DE CRISTA

O Fator de Crista é definido por (Road, 2014):

$$FC = \frac{\text{Valor de Pico}}{RMS} \quad (8)$$

Esta medida é de extrema importância para analisar impactos anormais de qualquer natureza, de forma a identificar defeitos localizados, que não são percebidos nas medições do valor RMS.

ASSIMETRIA

Mede o desvio em relação à média (Road, 2014):

$$\text{Assimetria} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (9)$$

Sendo:

- N - número total de pontos da amostra;
- x_i - valor do sinal num dado ponto i da amostra;
- i - Número da amostra;
- σ - desvio-padrão;
- μ - valor médio do sinal.

2.3.2.1.1 VIBRAÇÕES

No caso específico do nível global, ou RMS para as Vibrações, calculado este valor para aceleração e para a velocidade, é necessário depois compará-lo com os limites de referência. Segundo a SS 728000-1:2014 (SS 728000, 2014) - Avaliação de vibrações de fusos de máquinas-ferramentas pelas medições no alojamento do fuso - Parte 1: Fusos com rolamentos de corpos rolantes e unidades integradas operando a velocidades entre 600 e 30.000 rpm, e de acordo com as especificações da máquina, podemos analisar os dados de vibração segundo a Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 - Dados de referência para análise de vibrações LTSC (SS 728000-1:2014)

VIBRAÇÃO MECÂNICA DE MÁQUINAS ATÉ 15 KW DE POTÊNCIA - LTSC				
VELOCIDADE				
DE VIBRAÇÃO (RMS) [mm/s]	600<RPM≤ 6000	6000<RPM≤ 12000	12000<RPM≤ 18000	18000<RPM≤ 30000
0,7	A			
1,1	B			
1,8	C			
∞	D			

Tabela 4 - Dados de referência para análise de vibrações STSC (SS 728000-1:2014)

VIBRAÇÃO MECÂNICA DE MÁQUINAS ATÉ 15 KW DE POTÊNCIA - STSC				
ACELERAÇÃO				
DE VIBRAÇÃO (RMS) [m/s ²]	600<RPM≤ 6000	6000<RPM≤ 12000	12000<RPM≤ 18000	18000<RPM≤ 30000
6	A	A	A	A
10	B	A	A	A
15	B	B	A	A
20	C	B	B	A
25	C	C	B	B
30	C	C	C	B
35	D	C	C	C
40	D	D	C	C
45	D	D	D	C
50	D	D	D	D
∞	D	D	D	D

Sendo:

- A – Equipamento em bom estado, muito perto do ou no estado inicial;
- B – Nível Aceitável;
- C – Controlar de perto;

- D – Nível Inaceitável

Nesta norma, SS 728000-1:2014, os dados de vibração são recolhidos em diferentes velocidades ao longo da faixa de velocidade possível do fuso. Além disso, são utilizadas duas variáveis para avaliar a sua condição. Estes parâmetros são: Condição do Fuso a Longo Prazo (*Long Time Spindle Condition* - LTSC), que corresponde ao valor RMS da velocidade de vibração, e Condição de Fuso a Curto Prazo (*Short Time Spindle Condition* - STSC), que corresponde à raiz do valor quadrático médio ou RMS da aceleração. De acordo com o padrão, o LTSC representa apenas problemas detetáveis em baixas frequências (10 - 5000 Hz), associados a desalinhamento e desequilíbrio, por exemplo, e o STSC representa as vibrações no espectro de alta frequência (2000 - 10000 Hz) e, portanto, reflete os problemas associados à condição do rolamento.

2.3.2.1.2 EMISSÕES ACÚSTICAS

Os parâmetros mais utilizados para avaliação com recurso a emissões acústicas no domínio do tempo, são o nível global do sinal (ou a energia, ou RMS), o valor de pico, a contagem e os eventos (Choudhury *and* Tandon, 2000; Morhain *and* Mba, 2003; Nerella *and* Rao, 2018). Alguns destes parâmetros já foram abordados anteriormente, como é o caso do nível global, valor de pico, curtose, assimetria e fator de crista.

O valor de pico está relacionado com as características da fonte das emissões acústicas, e respetiva força gerada pelo seu material. Esta é influenciada pelas condições do transdutor selecionado, como a frequência de resposta e o amortecimento, a não ser que não esteja presente um defeito (He, Zhang, *and* Friswell, 2009).

Morhain *and* Mba (2003) estudaram alguns testes realizados por outros autores, de modo a retirar conclusões em relação aos parâmetros medidos. Um destes testes estudou a influência da carga em rolamentos novos e reparados, concluindo que a amplitude do sinal aumenta com a carga para ambos, porém chegando a ser cinco vezes superior para os reconicionados. Com a sua investigação, Morhain *and* Mba (2003) concluíram também que independentemente do tamanho de defeito na pista externa, o valor de pico é capaz de fornecer indicação da presença deste, usando um transdutor do tipo ressonante.

As contagens correspondem ao número de vezes em que a amplitude ultrapassa um nível limite definido de tensão, num determinado intervalo de tempo (Choudhury *and* Tandon, 2000).

Um conceito também muito relevante é o de evento. Um evento é um conjunto de contagens correspondente a uma onda transitória (Choudhury *and* Tandon, 2000; Morhain *and* Mba, 2003).

A energia é um parâmetro relevante, pois é sensível à carga, tamanho do defeito e velocidade de rotação, sendo este último o que mais influência tem. Relativamente à carga, esta só afeta a energia quando as outras condições de operação também aumentam (He *et al.*, 2009).

2.3.2.2 ANÁLISE DO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Esta análise é feita da mesma forma para as duas grandezas: vibração e emissões acústicas.

Uma vez que os parâmetros estatísticos são influenciados pelo ruído, a análise do espectro é realizada de forma a diagnosticar com mais precisão a condição do componente em estudo, como referido anteriormente (De Castelbajac *et al.*, 2014).

Os sinais recolhidos durante a monitorização, que estão no domínio do tempo, são transformados no domínio da frequência, através da Transformada de Fourier (*Fourier Transform* - FT). A FT decompõe o sinal recolhido em sinais de seno e cosseno de diferentes frequências (Chen, 1993):

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

Sendo:

- f – Frequência (Hz);
- t – Tempo (s);
- x - Sinal no domínio do tempo (s);
- X - Sinal no domínio da frequência, ou seja, é a FT (Hz);
- j - Número inteiro.

Devido à sua complexidade, muitas vezes esta transformação é feita com recurso ao algoritmo da Transformada rápida de *Fourier* (FFT). Assim sendo, os sinais são exibidos na forma de picos no espectro nas frequências onde ocorrem as repetições, permitindo que este espectro seja depois comparado com as frequências características das falhas, como é o caso das frequências dos rolamentos que serão seguidamente enunciadas, aplicando deste modo uma análise comparativa. Contrariamente à análise no domínio do tempo, aqui existe alguma quantidade de informação que se perde na transformação, sendo recomendado um armazenamento prévio do sinal em bruto, pois após a transformação não é possível recuperá-la (Mechefske, 2010). A FT apenas é eficazmente aplicada a sinais estacionários (Chen, 1993).

2.3.3 TOMADA DE DECISÃO

Esta é a fase fundamental da implementação de um programa de CBM, da qual depende o seu sucesso (Bae *et al.*, 2009).

Como referido anteriormente, esta etapa é composta por duas fases, Diagnóstico e Prognóstico. Enquanto que a primeira fase identifica a localização e tipo de falha, a segunda estima a vida útil restante (Patidar *and* Mandloi, 2015).

Para que esta etapa seja eficaz, são necessários três tipos de dados (Paolanti *et al.*, 2018):

- Dados relacionados com falhas que ocorreram: quais são, como se manifestaram e quais as suas causas;
- Dados relacionados com as manutenções efetuadas, que componentes se repararam ou substituíram, que atividades preventivas se realizaram;
- Dados sobre o estado da máquina, fundamentais para se fazer o prognóstico da vida útil restante (*Remaining useful life* - RUL).

Segundo Jardine *et al.* (2006), o Prognóstico é mais eficiente a evitar paragens, porém, quando este falha, o Diagnóstico é importante. Deste modo, para implementar a CBM pode recorrer-se a um dos dois, ou aos dois.

2.3.3.1 DIAGNÓSTICO

Para se efetuar um Diagnóstico, primeiro é necessário detetar a falha, ou seja, identificar que algo está errado na condição da máquina. De seguida, procura-se localizar qual o componente defeituoso, ou seja, isolá-la, terminando com a determinação do tipo de falha, a sua natureza (Jardine *et al.*, 2006).

Este Diagnóstico pode ser realizado de diferentes formas. Mobley (2016) propõe as abordagens presentes na Figura 22.

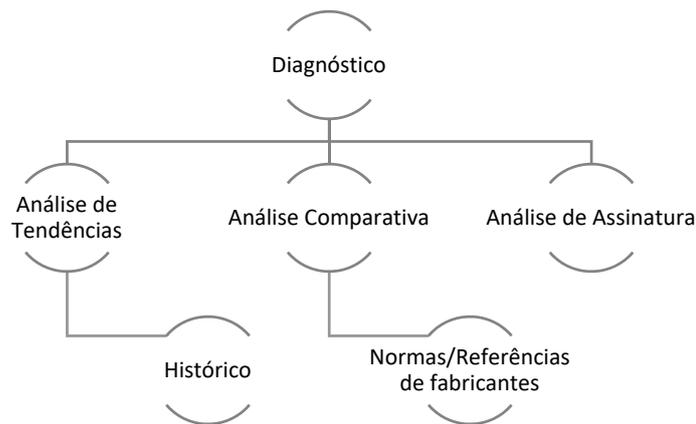


Figura 22 - Tipos de diagnóstico (Mobley, 2016)

A Análise de Tendências refere-se à utilização dos dados históricos, sabendo que tanto os dados de monitorização recolhidos estão armazenados, como dados relativos a reparações ou substituições que foram feitas, sendo que todos estes dados têm de estar normalizados. Comparando estes registos, é possível aferir se houve alguma alteração no equipamento. Esta análise tem a desvantagem de que as variações no processo influenciam os sinais que são recolhidos, não sendo depois correto compará-los com os dados armazenados (Mobley, 2016).

A Análise Comparativa utiliza normas ou valores estabelecidos pela organização ou pelo fabricante, para comparação com os dados monitorizados (Mobley, 2016).

A Análise de Assinatura observa o espectro de frequência obtido através da análise no domínio do tempo, ou tempo-frequência, de forma a diagnosticar defeitos que têm frequências de espectro características (Mobley, 2016).

No entanto, Jardine *et al.* (2006) propõe uma abordagem agora emergente, a Análise por Inteligência Artificial, que se tem revelado eficiente em comparação com as anteriormente descritas. Exemplos destas técnicas são as redes neurais artificiais (*Artificial Neural Networks* --ANN), sistemas de lógica difusa e algoritmos evolutivos. As desvantagens destes métodos são a dificuldade na obtenção de dados que possam ser utilizados para treino, e também a necessidade de conhecimentos especializados. Patidar *and* Mandloi (2015) ao investigarem diferentes técnicas de processamento de emissões acústicas, concluíram que, com a quarta revolução industrial e consequente desenvolvimento da Inteligência Artificial (IA), esta pode ser uma ferramenta adequada para monitorização dos equipamentos. Porém, é ainda uma técnica pouco estudada. No entanto, baseada na IA, a ANN foi aplicada com sucesso a CBM com recurso a emissões acústicas.

2.3.3.2 PROGNÓSTICO

É nesta etapa que se prevê quando a falha irá ocorrer, ou seja, o seu objetivo é determinar qual é o tempo de operação restante da máquina, imediatamente antes da falha (Jardine *et al.*, 2006).

A vida útil restante do equipamento (RUL), consiste na previsão do tempo que este tem até que atinja uma falha, de forma a informar o colaborador da manutenção atempadamente. Devido à aleatoriedade dos mecanismos de falha e incerteza inerente de uma previsão, o RUL é habitualmente representado por uma função densidade de probabilidade. É importante ter em atenção a aleatoriedade inerente aos mecanismos de falha (Vogl *et al.*, 2019).

Para Bae *et al.*(2009), antes de se determinar o RUL, devemos ter informações acerca de:

- Estado de desgaste;
- O que causou o seu início;
- A sua severidade;
- A sua velocidade de avanço, entre outros fatores.

Na literatura, os diferentes autores dividem os métodos de prognóstico de forma variada, sendo que existem métodos comuns. Bae *et al.* (2009) divide-os em quatro tipos, representados na Figura 23.

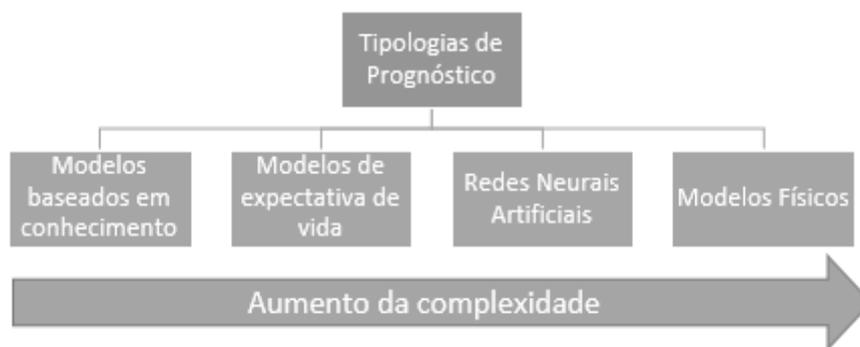


Figura 23 - Proposta de divisão dos modelos de prognóstico (Bae *et al.*, 2009)

Os modelos baseados em conhecimento, relacionam o que é medido com um sistema especializado ou uma regra difusa, que têm um banco de dados de falhas. Apesar de ser um modelo de fácil compreensão, não é possível saber com exatidão o RUL (Bae *et al.*, 2009).

Os modelos de expectativa de vida, por sua vez, calculam o RUL com base em modelos estocásticos, como o caso da função de fiabilidade ou a probabilidade condicional, ou estatísticos, como a extrapolação de tendência ou a média móvel auto-regressiva. Existem muitos *softwares* disponíveis para este modelo, porém exige grande quantidade de amostra de dados (Bae *et al.*, 2009).

As redes neurais artificiais, estimam o RUL através de previsões ou outros parâmetros, a partir de dados observados. É um processo complexo, que envolve aprendizagem (Bae *et al.*, 2009).

Por último, os modelos físicos representam, através de leis físicas, o comportamento do processo de degradação, prevendo com exatidão o RUL. Porém, estes modelos nem sempre estão disponíveis. Tal como representado na Figura 23, o modelo baseado no conhecimento é o menos complexo, sendo o último o mais complexo (Bae *et al.*, 2009).

Os autores Zhang *et al.* (2009), por sua vez, dividem o Prognóstico em apenas duas abordagens, propondo depois uma outra, conjugação destas duas (híbrida), como se pode observar na Figura 24.



Figura 24 - Proposta de divisão dos modelos de prognóstico (Zhang *et al.*, 2009)

Segundo Zhang *et al.* (2009), a abordagem de Falha Física, pressupõe que todas as falhas são originadas por processos físicos. Para a aplicar, é necessário fazer uma análise do modo de falha, mecanismo e efeito, controlar a carga ambiental e operacional do ciclo de vida, reduzir os dados para ser possível retirar os parâmetros necessários, calcular os danos e, por fim, estimar a RUL.

A abordagem baseada em dados é depois subdividida por Zhang *et al.* (2009), sendo as suas principais subcategorias o *Machine Learning* e a Estatística. Os autores dividem então esta abordagem conforme, mostra a Figura 25.

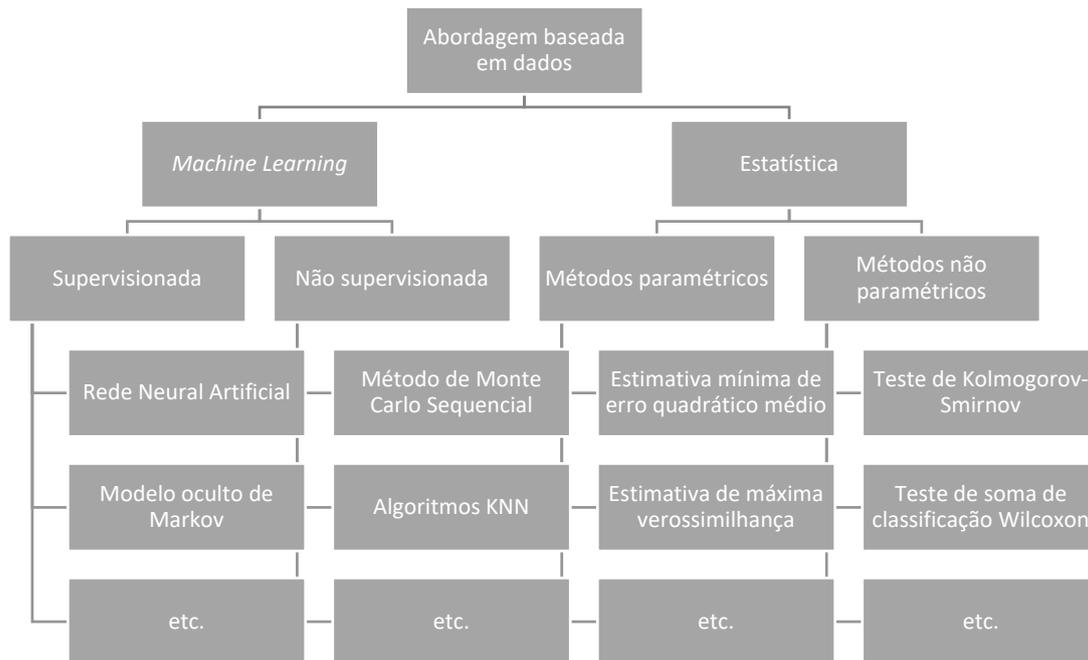


Figura 25 - Divisão do modelo de prognóstico baseado em dados (Zhang *et al.*, 2009)

Este modelo de Zhang *et al.* (2009), inclui três dos modelos propostos por Bae *et al.* (2009), baseado em conhecimento, expectativa de vida e redes neurais artificiais. Todas as ilações retiradas neste modelo baseiam-se em correlações, algoritmos ou padrões obtidos dos dados, sem ter em conta as propriedades físicas dos materiais.

A Abordagem da Falha Física é mais precisa que esta última, mas necessita de conhecimento aprofundado dos mecanismos de falha, e de informação do equipamento. A Abordagem orientada por dados é mais simples e flexível, mas no caso de se optar pelo *Machine Learning*, é necessária alguma complexidade computacional e dados para treino. No caso da Estatística, as condições de produção do equipamento não são tidas em conta, e muitas vezes estas influenciam o RUL, e exige uma grande quantidade de dados de falha para aplicar os algoritmos (Zhang *et al.*, 2009).

Analisando os dois modelos, Zhang *et al.* (2009) propôs então um modelo Híbrido, que conjugasse o melhor de cada um destes. A primeira parte é igual à abordagem de Falha Física, ou seja, faz-se uma análise do modo de falha, mecanismo e efeito, de modo a se selecionarem as variáveis monitorizadas posteriormente pela abordagem baseada em dados.

2.3.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na literatura todos estes conceitos abordados no capítulo 2.3 foram sustentados experimentalmente:

Rastegari *et al.* (2017) implementou um sistema de monitorização da condição através da vibração, com diferentes tipos de máquinas ferramenta, em operação e sem carga. Como limites de referência, usou a norma SS 728000-1:2014. O acelerómetro selecionado tinha uma sensibilidade de 100 mV/g e foi colado à carcaça do fuso. O sensor estava ligado a uma unidade de medição, que, por sua vez, estava ligada a um computador. Com os resultados obtidos, conclui que a medição sem carga, e periodicamente, era a mais indicada, pois durante a operação gera-se ruído extra e a velocidade varia ao longo do tempo, não permitindo uma análise eficaz. Assim sendo, mediu durante cinco minutos a uma velocidade de rotação aproximada da velocidade máxima. Com os resultados experimentais, conclui também, que os dados da monitorização de condições devem ser analisados principalmente pela análise de tendências, e pela comparação dos resultados das medições com os dados de quando as máquinas eram novas, e que apesar de existirem diferentes máquinas ferramenta, não existe uma norma de referência para cada tipo de máquina.

Road (2014) realizou um teste para verificação da eficiência das AE na deteção e localização dos defeitos em rolamentos, e quais os parâmetros mais adequados para tal. Deste modo, utilizou um microfone colado na parte superior do alojamento dos rolamentos, sabendo que um era saudável e o outro tinha defeito. Este enviaria os sinais para um cartão de aquisição de dados, que depois seriam processados através do *software* LabVIEW. Em primeiro lugar, foram calculadas as frequências fundamentais do rolamento. Em seguida, fez-se a recolha dos sinais, primeiramente analisados no domínio do tempo. Com estes dados, calcularam-se os parâmetros estatísticos RMS, desvio-padrão, variância, curtose, assimetria e fator de crista, que foram depois comparados com os valores padronizados. Caso os valores estivessem de acordo com os padrões, então concluíam-se que era saudável. Caso tal não acontecesse, teria de se determinar a localização do defeito. Assim sendo, analisava-se o sinal no domínio da frequência, usando a transformada de *Fourier*, para uma análise de baixa frequência, e a transformada de *Hilbert* para uma análise de alta frequência. Os resultados eram então comparados com as frequências fundamentais, localizando assim o defeito. Concluindo, Road (2014) obteve os melhores resultados através dos parâmetros estatísticos no domínio do tempo e da Transformada de *Hilbert*, no domínio da frequência.

Rao *and* Ratnam (2015) compararam a monitorização de defeitos em rolamentos, utilizando as Vibrações e utilizando as Emissões Acústicas. Para isso, utilizou cinco rolamentos defeituosos com tamanhos de defeito de 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 e 1,1 mm, com profundidade equivalente para todos de 0,3 mm, e um rolamento saudável. Ambos os sensores acústico e de vibração foram montados magneticamente, sendo que o primeiro recolhe 2048 amostras/s e o segundo, que tem a particularidade de ser um

acelerómetro triaxial, recolhe 1024 amostras/s. A carga aplicada radialmente aos rolamentos será variável, de 2 kN ou 4 kN, e a velocidade de rotação varia de 500 a 1500 rpm. Para análise no domínio da frequência, utilizou a FFT com recurso a *softwares* especializados. Com estes testes, concluiu que: para a vibração, na análise no domínio do tempo, a velocidade RMS aumenta com o aumento da velocidade, carga e tamanho do defeito, e permitiu concluir a presença do defeito na pista externa, como era de esperar. Na análise do domínio da frequência, apenas acima de 900 rpm se deteta no espetro o pico dos defeitos, mas existem picos de maior frequência que disfarçam o diagnóstico. Analisando as emissões acústicas no domínio do tempo, a energia em cada impacto é encontrada, sendo que a área sobre a sua curva aumenta com o aumento do tamanho do defeito. Na análise de frequência, o defeito é facilmente observado, independentemente da velocidade de rotação. As emissões acústicas são relevantes para caracterizar e identificar os tamanhos dos defeitos, sendo mais eficazes que a Vibração.

Morhain *and* Mba (2003) simularam o estado inicial dos defeitos dos rolamentos e recorreram a emissões acústicas para os monitorizar. Utilizaram dois tipos de defeitos, um na pista externa e um na interna, cada um com as seguintes largura, profundidade e comprimento: 1 mm, 75 μ m e 5 mm, que consideraram como defeitos pequenos, e um comprimento de 15 mm para os defeitos grandes. Utilizaram várias velocidades de rotação e cargas. Para medir o ruído de fundo, estabeleceu 4000 rpm a 0 kN de carga. Concluíram que, tanto as contagens como o RMS, são parâmetros de sucesso para detetar defeitos em rolamentos. Além das relações anteriormente descritas no capítulo 2.3.2.1.2, concluíram que diferentemente doutros resultados nesse capítulo referidos, a contagem pode ser usada para detetar defeitos de até 15 mm de comprimento e 1 mm de largura. Consideraram relevante a descoberta de que o RMS e as contagens são incapazes de distinguir o que os autores definiram como pequenos e grandes defeitos na pista interna. Como última conclusão, defenderam que as ilações retiradas, também seriam aplicáveis a rolamentos com pista externa rotativa e pista interna estacionária, contrariamente aos que utilizaram.

Observando os estudos retirados da literatura, conclui-se que não existe um método ótimo de monitorização, mas que, tal como referido anteriormente, se deve utilizar uma conjugação de técnicas para um diagnóstico mais fiável. Deste modo, a escolha da vibração e das emissões acústicas é adequada e, se corretamente implementada, traz resultados importantes para a monitorização da condição.

Antes de se definirem as características técnicas dos sensores selecionados, analisaram-se as conclusões provenientes dos testes realizados por Rastegari *et al.* (2017) para aplicar à medição de Vibração. Estes dados foram depois sumarizados por Rastegari (2019), e encontram-se presentes na Tabela 5:

Tabela 5 - Fatores de implementação de um sistema de monitorização por vibração (Rastegari, 2019)

FATOR DE IMPLEMENTAÇÃO	EXPLICAÇÃO
Tipo de sensor	Acelerómetro com sensibilidade de 100 mV/g para fusos com velocidade de operação entre 60 e 30000 rpm
Tipo de instalação do sensor	Nas direções radial e axial, nas extremidades dianteira e traseira do fuso, o mais próximo possível do rolamento
Condição de carregamento da máquina para medição	Condições sem carga (sem corte)
Velocidade de rotação da máquina para medição	A velocidade de operação da máquina, para evitar frequências de ressonância

DESENVOLVIMENTO

3.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA DE ACOLHIMENTO

3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

3.3 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DO TRABALHO

3.4 TEMPESTADE DE IDEIAS

3.5 DEFINIÇÃO TÉCNICA DA SOLUÇÃO

3.6 MODELO DE FUNCIONAMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA DE ACOLHIMENTO

A Sá Couto e Monteiro, SA. é uma empresa portuguesa, fundada em 1986. A sua atividade consiste na maquinação CNC de precisão, em série, utilizando como matérias-primas os aços em geral, aços inoxidáveis, alumínio, titânio, latão e materiais não metálicos [3].

A empresa está sediada no loteamento industrial de Silva Escura, na Maia [3].

Em 2007 criou a marca SISMA® [3].

No ano de 2013, por sua vez, iniciou-se o investimento em infraestruturas (sala limpa), equipamentos e obtenção de *know-how* especializado e com foco no mercado de produção de dispositivos médicos, com especial destaque para produtos odontológicos e de componentes de osteossíntese. No ano de 2014 foi definido o arranque efetivo da produção deste tipo de produtos, e em 2015 ficou concluído o processo de certificação pela norma ISO 13485. Foi assim criada a marca SISMA® *Medical* [3].



Figura 26 - Cronologia da empresa até à criação da SISMA Medical [3]

A empresa é certificada pelas normas NP EN ISO 9001: 2015 da Qualidade, NP EN 14001:2015 do Ambiente, NP EN ISO 13485:2012 de Dispositivos Médicos e encontra-

se, neste momento, em fase de implementação da norma EN 9100 da Indústria Aeroespacial [3].

No presente ano, a empresa construiu e concluiu a mudança para as novas instalações, dispondo agora de uma área coberta total de 6000 m². Nestas novas instalações, o edifício está desenhado de forma a tender ser autossustentável, em termos de energia elétrica e de água no processo industrial, pelo que em termos de consumo energético, consumo de água e gestão de resíduos, prevêem-se reduções significativas, refletindo as boas práticas de proteção ambiental da empresa [4].



Figura 27 - Maquete das novas instalações da empresa [4]

Quanto à sua capacidade produtiva, a empresa dispõe de Tornearia e Fresagem, sendo que na Tornearia se utilizam Tornos Suíços de 11 eixos, com capacidade de diâmetro de 2 mm até 60 mm, e na Fresagem, por sua vez, empregam-se máquinas de até 5 eixos, com capacidade XY de 500 por 900 mm [3].

A Sá Couto e Monteiro, SA. exporta cerca de 90% da sua produção, principalmente para países europeus, nomeadamente Reino Unido, Suécia, França, Espanha, Suíça e Alemanha [3].

3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Como referido anteriormente, a necessidade de monitorização da condição dos equipamentos assume um papel importante atualmente face à competitividade da Indústria, pois é responsável por aumentos de produtividade e disponibilidade, redução de custos e até de segurança para as próprias instalações e seus colaboradores (Albarbar *et al.*, 2008; Vanraj *et al.*, 2016).

Devido à multiplicidade de equipamentos da empresa, foi decidido focar o estudo-piloto apenas na Tornearia, mais especificamente, nos Tornos Suíços.

3.2.1 DESCRIÇÃO GENÉRICA DO TORNO

O trabalho desenvolvido será focado nos Tornos Suíços, como referido anteriormente. Estes constituem a maior percentagem do parque de máquinas da empresa. Estas máquinas ferramenta são responsáveis por produzir peças de grande precisão e qualidade, sendo que para isso o seu estado de degradação tem de ser conhecido.

De forma genérica, o torneamento aplica-se a todos os metais, alguns plásticos e cerâmicos. Os tornos CNC têm a vantagem de serem programáveis, o que permite que os seus eixos sejam controlados simultaneamente. O operador apenas introduz o código na máquina, o que se traduz num grande rigor dimensional e boa reprodutibilidade das peças fabricadas. Estes tornos têm sistemas porta-ferramentas que contemplam as várias ferramentas de corte que o programador pode utilizar. Podem, também, ter motores auxiliares com movimentos em eixos próprios. Devido à sua forma fechada, permitem maior segurança do operador e limpeza da fábrica.

Como desvantagens, estes equipamentos apresentam elevado custo de aquisição e de operação, e considerada limitação dimensional, tanto em termos de comprimento da matéria-prima, como de diâmetro.

3.2.2 COMPONENTES EM ESTUDO

Para a implementação de um sistema de monitorização da condição é necessário primeiro compreender quais os componentes críticos do sistema em análise. Estes podem ser considerados críticos porque, por exemplo:

- têm dados históricos de falha mais elevados;
- a sua substituição é cara e demorada;
- a sua falha causa danos catastróficos noutros componentes;
- a sua má condição produz peças não conformes, em termos dimensionais e de qualidade.

Os Tornos Suíços são máquinas ferramenta CNC caracterizados por alta precisão e eficiência (Li and Pi, 2011). O sistema de fusos é um dos subsistemas críticos deste tipo de máquina-ferramenta (Rastegari, 2019). Os fusos nestas máquinas têm duas tarefas (Abele *et al.*, 2010):

- Rodar a peça de trabalho com precisão;

- Transmitir a energia requerida na zona de corte para remoção do metal;
- Deste modo, conclui-se que têm influência direta na qualidade da peça (Rastegari, 2019).

De forma genérica, os fusos são constituídos conforme mostra a Figura 28 (Abele *et al.*, 2010).

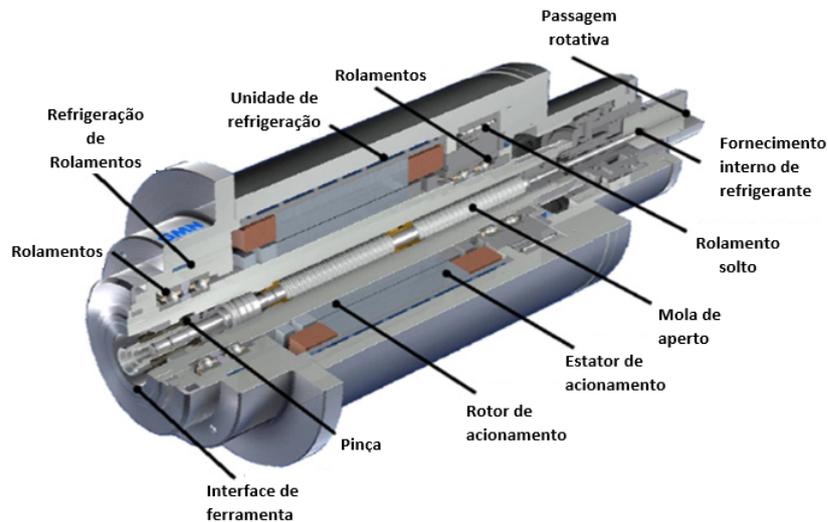


Figura 28 - Constituição do fuso (Abele *et al.*, 2010)

Os principais componentes que falham nos fusos são o estator, o rotor e os rolamentos, sendo que os rolamentos correspondem a cerca de 50% das falhas em máquinas elétricas (Zhou *et al.*, 2007). A falha dos rolamentos traz danos catastróficos ao fuso, que por sua vez provoca uma avaria na máquina (Choudhury *and* Tandon, 2000; Rastegari *et al.*, 2017; Shakya *et al.*, 2013). Estes componentes são de baixo custo, quando substituídos atempadamente, porém, quando os danos se propagam para o fuso e, por consequência, para o torno, os custos podem ser severos. Alguns dos motivos de falha deste componente são baixa lubrificação, excesso de carga, incorreta instalação e desequilíbrio e desalinhamento do fuso (Mba *and* Rao, 2006). Os rolamentos são amplamente utilizados, pois são económicos e fiáveis (He *et al.*, 2009).

No entanto, implementar uma estratégia de manutenção predeterminada neste componente torna-se difícil, uma vez que as máquinas trabalham a diferentes velocidades de rotação e ferramentas de corte, em diferentes ambientes e com materiais diferentes (Rastegari, 2019). É neste sentido, que a monitorização da condição estabelece uma estratégia mais vantajosa para monitorizar estas máquinas. Por estas razões, os rolamentos foram os componentes selecionados para este estudo.

Existem diferentes tipos de rolamentos. Por norma, estes fusos têm rolamentos de esferas de contacto angular, porque estes conferem baixo atrito e maior capacidade de suporte de cargas externas, axial e radialmente (Abele *et al.*, 2010).

Os rolamentos de esferas de contacto angular são constituídos pelos elementos presentes na Figura 29 [9]

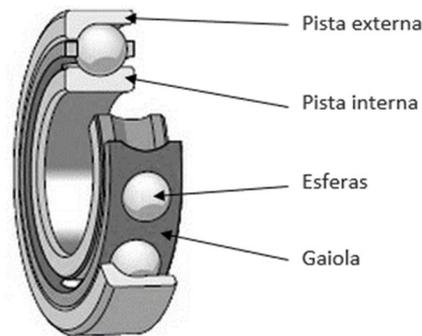


Figura 29 - Legenda de um rolamento de esferas [9]

Nos rolamentos surgem, essencialmente, dois tipos de defeitos:

- Localizados: incluem fendas ou lascas devido a fadiga, iniciando a sua propagação abaixo da superfície. Quanto maior a carga e velocidade de rotação a que o rolamento está sujeito, mais rápida é esta propagação (Patidar *and* Mandloi, 2015);
- Distribuídos: que surgem a partir dos primeiros ao longo do tempo (De Castelbajac *et al.*, 2014). Podem também surgir devido a erros no seu fabrico, montagem ou acoplamento no eixo. Caracterizam-se por rugosidades na superfície, desalinhamento das pistas, ou os corpos rolantes podem não ter igual diâmetro (Patidar *and* Mandloi, 2015).

A manutenção preditiva deste componente tem como principal objetivo detetar os defeitos localizados o mais rapidamente possível, antes que se espalhem, passando a distribuídos.

3.3 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DO TRABALHO

Para definir os requisitos necessários para o trabalho, é importante conhecer os parâmetros que podem ser utilizados para monitorizar a condição, as variáveis de entrada, e o modo como se retira a conclusão ao recolher os sinais por estas recolhidos, as variáveis de saída.

3.3.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA

As variáveis selecionadas foram a Vibração e as Emissões Acústicas, que são ambas técnicas não destrutivas, que não interferem na operação normal das máquinas e cuja aplicação já foi comprovada experimentalmente, conforme justificado no capítulo 2.3.1

A escolha de duas variáveis de medição, e não apenas uma, deve-se à maior eficiência quando se monitoriza com múltiplos sensores, e como vimos anteriormente, a Vibração deteta danos que as EA não detetam, e vice-versa, complementando-se assim (Jardine *et al.*, 2006).

Explicando mais pormenorizadamente como surge a emissão acústica devido a problemas nos rolamentos, esta deve-se ao contacto entre as rugosidades superficiais e ao impacto das esferas dos rolamentos sobre o defeito existente nas pistas externa e interna. Esta libertação de energia através destas ondas, as emissões acústicas, de forma direta e abundante, fornece informações sobre as falhas dos rolamentos (He *et al.*, 2009).

3.3.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA

Após a análise dos dados e obtenção de valores, três tipos de alertas podem ser gerados:

- Alerta do tipo 1: monitorização com intervalo de tempo menor devido à grande probabilidade de defeitos na fase inicial nos rolamentos;
- Alerta do tipo 2: monitorização ao pormenor dos sinais, iniciando o planeamento da substituição/reparação dos rolamentos devido ao surgimento de defeitos;
- Alerta do tipo 3: os rolamentos atingiram o ponto limite de funcionamento, é necessário gerar uma ordem de trabalho e parar a máquina, pois a sua falha poderá comprometer outros componentes.

É de realçar que em algumas situações, o alerta do tipo 1 pode não se aplicar, nomeadamente na análise por vibração, que não é capaz de detetar os defeitos iniciais nos rolamentos.

No caso do Torno CNC em estudo, a rotação máxima é de 8000 rpm. Assim sendo, e de acordo com os dados do capítulo 2.3.2.1 e 2.3.2.2, já é possível definir os respetivos alertas de acordo com o problema.

3.3.2.1 VIBRAÇÕES E EMISSÕES ACÚSTICAS

DOMÍNIO DO TEMPO:

Para um rolamento sem defeitos, o valor do coeficiente de curtose é aproximadamente três. Um valor superior a este é considerado como uma indicação do surgimento de falha. Porém, este valor reduz-se à medida que o defeito atinge estágios avançados. Ou seja (Road, 2014):

Para rolamentos:

- $K < 3$ → Nível normal, nada a ser analisado;
- $K \geq 3$ → Surgimento de defeitos, manter sob controlo, alerta do tipo 2;
- K começa a decrescer após ter sido registado um aumento nas medições anteriores → Falhas generalizadas, componente em estado inaceitável, gerar Ordem de Trabalho, alerta do tipo 3.

O Fator de Crista é normalmente utilizado para deteção de falhas em rolamentos, sendo que (Road, 2014):

Para os rolamentos:

- $FC \leq 5$ → Nível normal, nada a ser analisado;
- $FC > 5$ → Surgimento de defeitos localizados, alerta do tipo 2;
- FC diminui e RMS aumenta → Falhas generalizadas, componente em estado inaceitável, gerar Ordem de Trabalho (alerta do tipo 3).

O parâmetro de assimetria é utilizado para aferir se os dados são simétricos em relação à média de uma distribuição Normal, sendo que os valores negativos de assimetria indicam os dados que estão inclinados para a esquerda, e os valores positivos para a assimetria indicam os dados que estão inclinados para a direita. Quando não existem defeitos, é expectável que a assimetria seja zero (Road, 2014).

- Valor da assimetria diferente de zero gera um alerta do tipo 2, uma vez que não é possível distinguir quais os valores para cada tipo de alerta. Deste modo, deve ser utilizado em conjunto com outro parâmetro para melhor análise.

DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA:

Para aplicar a FFT e a partir desta analisar os rolamentos, é necessário conhecer as frequências destes. Deste modo, sabe-se que um rolamento defeituoso gera determinada frequência em função do defeito, que podem ser na pista interna, externa, nas esferas e na gaiola (Nerella *and* Rao, 2018; Patidar *and* Mandloi, 2015; Road, 2014). Estas frequências relacionam-se com a geometria do rolamento em análise e podem ser calculadas teoricamente (Patidar *and* Mandloi, 2015):

- Defeito na pista interior (BPFI)

$$BPFI \text{ [Hz]} = w * \frac{Nf}{2} * \left(1 + \left(\frac{d}{D}\right) * \cos a\right) \quad (18)$$

- Defeito na pista exterior (BPFO)

$$BPFO \text{ [Hz]} = w * \frac{Nf}{2} * \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right) * \cos a\right) \quad (19)$$

- Defeito na gaiola (FTF)

$$FTF \text{ [Hz]} = \frac{w}{2} * \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right) * \cos a\right) \quad (20)$$

- Defeito na esfera (BSF)

$$BSF \text{ [Hz]} = \frac{w}{2} * \frac{D}{d} * \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right) * \cos a\right) \quad (21)$$

Sendo:

- d – Diâmetro das esferas (mm);
- D – Diâmetro médio do rolamento (mm);
- Nf – Nº de esferas;
- α – ângulo de contacto (rad);
- w – Rotação do veio (rad/s).

Após se calcular as equações dos rolamentos que quando alguma destas frequências é detetada, gera-se um alerta do tipo 3.

Estas frequências apenas se aplicam a rolamentos com a pista externa estacionária, e são normalmente inferiores a 500 Hz, ou seja, na gama da baixa frequência (Gupta *and* Pradhan, 2017).

3.3.2.2 VIBRAÇÕES

DOMÍNIO DO TEMPO:

Recorrendo aos conceitos e normas expostas em 2.3.2.1.1, foram definidos os limites e respetivos alertas.

Uma vez que os defeitos nos rolamentos podem ter origem em desalinhamento ou desequilíbrio do fuso (SKF, 2000), também para estes foram definidos os limites.

No caso do desalinhamento e desequilíbrio do fuso:

- Para qualquer velocidade de rotação (até aos 8000 rpm):
 - $VRMS \leq 0,7$ mm/s → Máquina como nova, nada a ser analisado;
 - $0,7 < VRMS \leq 1,1$ mm/s → Vibração normal, nada a ser analisado;
 - $1,1 < VRMS \leq 1,8$ mm/s → Surgimento de defeitos, manter sob controlo, alerta do tipo 2;
 - $VRMS > 1,8$ mm/s → Falhas generalizadas, componente em estado inaceitável, gerar Ordem de Trabalho, alerta do tipo 3.

No caso de problemas associados a defeitos de rolamentos:

- Para velocidade de rotação de 600 até 6000 rpm:
 - $ARMS \leq 6$ m/s² → Máquina como nova, nada a ser analisado;
 - $6 < ARMS \leq 15$ m/s² → Vibração normal, nada a ser analisado;
 - $15 < ARMS \leq 30$ m/s² → Surgimento de defeitos, manter sob controlo, alerta do tipo 2;
 - $ARMS > 30$ m/s² → Falhas generalizadas, componente em estado inaceitável, gerar Ordem de Trabalho, alerta do tipo 3.
- Para velocidade de rotação de 6000 até 12000 rpm:
 - $ARMS \leq 10$ m/s² → máquina como nova, nada a ser analisado;
 - $10 < ARMS \leq 20$ m/s² → Vibração normal, nada a ser analisado;
 - $20 < ARMS \leq 40$ m/s² → Surgimento de defeitos, manter sob controlo, alerta do tipo 2;
 - $ARMS > 40$ m/s² → Falhas generalizadas, componente em estado inaceitável, gerar Ordem de Trabalho, alerta do tipo 3.

3.3.2.3 EMISSÕES ACÚSTICAS

DOMÍNIO DO TEMPO:

Tal como para a vibração, conforme exposto em 2.3.2.1.2 foram definidas as relações entre os parâmetros medidos e a condição dos rolamentos.

Para o valor de pico, a amplitude vai aumentando à medida que o defeito surge, independentemente da carga aplicada e tamanho do defeito. A velocidade de rotação, por sua vez, interfere com o valor de pico medido (He *et al.*, 2009).

Em relação ao parâmetro contagens, este aumenta com o aumento da velocidade de rotação e carga do rolamento, não sendo este último tão evidente (Morhain and Mba, 2003). Segundo He *et al.* (2009), além da influência das condições de teste referidas, este parâmetro também aumenta com o tamanho do defeito, concluindo que a sua eficácia será mais elevada quanto maior for o defeito e a velocidade de rotação. Morhain and Mba (2003) referiu na sua investigação um estudo que comprova o aumento das contagens com as condições referidas, mas que refere que as emissões acústicas só identificam falhas com menos de 250 μm de diâmetro.

Deste modo, He *et al.* (2009), como o seu estudo tirou as conclusões sumariadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Relação entre as condições de operação e os parâmetros de EA (He *et al.*, 2009)

AUMENTO DA CONDIÇÃO	VALOR DE PICO	CONTAGENS	CURTOSE	ENERGIA
CARGA	-	Aumenta, sem muitas evidências	-	Aumenta apenas quando se aumenta os outros parâmetros
VELOCIDADE DE ROTAÇÃO	Aumenta	Aumenta	1º aumenta, depois decresce	Aumenta
TAMANHO DO DEFEITO	Só aumenta quando o defeito está à superfície	Aumenta	1º aumenta, depois decresce	Aumenta ligeiramente

Nas emissões acústicas, não existe tanta informação acerca dos valores limite a partir dos quais se pode considerar o surgimento de um defeito. A identificação deste é feita pelo aumento do parâmetro em estudo. Deste modo, o alerta do tipo 1 é despoletado com o aumento do parâmetro, sendo que, juntamente com a análise por vibração se pode retirar uma melhor conclusão, surgindo com o sucessivo aumento o alerta do tipo 2 e, por sua vez, do tipo 3.

Concluindo, em relação à sensibilidade dos parâmetros com as condições de trabalho, a velocidade de rotação é a condição que mais influencia os parâmetros, ao contrário da carga aplicada, em que as evidências da sua influência ainda não são bem claras.

Relativamente à validação dos parâmetros enunciados, para Morhain *and* Mba (2003), o valor de pico e as contagens são os mais eficazes na deteção de defeitos em rolagentos. O autor concluiu também que o limite de tensão para as contagens que é estabelecido, deve ser pelos menos 30% da velocidade mais baixa e da condição de operação de carga, tendo em atenção que em ambientes industriais em que as máquinas trabalhem em variadas velocidades, o ruído devia ser conhecido em todas elas. Também concluiu que as emissões acústicas são mais robustas para monitorização de defeitos na pista externa.

3.3.3 ORGANIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS METODOLOGIAS

A Mecânica e a Automação serão responsáveis pela Sensorização do sistema, que corresponde à seleção e posicionamento dos sensores e do sistema de aquisição de dados, e estabelecimento dos limites de referência, de acordo com os componentes e variáveis selecionados.

A Informática estabelece a ligação entre os sinais recebidos pelo computador através do sistema de aquisição de dados, que são controlados através de um *software* especializado, e posteriormente armazenados. É neste *software* que serão registados os limites de referência para as variáveis em análise, concluindo se existe ou não necessidade de lançar um alerta.

A Manutenção, com os resultados recebidos, despoleta uma ação segundo a lógica seguinte:

- Alerta do tipo 1: comportamento Normal, nada a registar;
- Alerta do tipo 2: manter sob controlo;
- Alerta do tipo 3: gerar Ordem de Trabalho.

Deste modo, a Figura 30 sintetiza as metodologias utilizadas.



Figura 30 - Metodologias utilizadas

3.4 TEMPESTADE DE IDEIAS

Tendo em conta que a Manutenção Preditiva não está presente atualmente na empresa, apenas a Manutenção Corretiva e Predeterminada, importa suportar a ideia de que a sua implementação trará resultados significativos à empresa.

3.4.1 ANÁLISE CRÍTICA DAS IDEIAS

Na Figura 31 está presente a constituição do sistema computadorizado de Monitorização da condição. Este sistema é constituído por transdutores que são responsáveis por enviar os sinais recolhidos à eletrónica de diagnóstico. É neste dispositivo que se faz a aquisição e análise dos dados no domínio do tempo e da frequência. Após esta análise, os dados são enviados para um computador. Nele, e com recurso ao *software* apropriado, o operador atribuiu os valores de referência para cada tipo de limite (alerta do tipo 1, 2 e 3), de acordo com os parâmetros que quer monitorizar. Deste modo, com base nas informações do acelerómetro, o *software* emite os alertas de manutenção adequados.

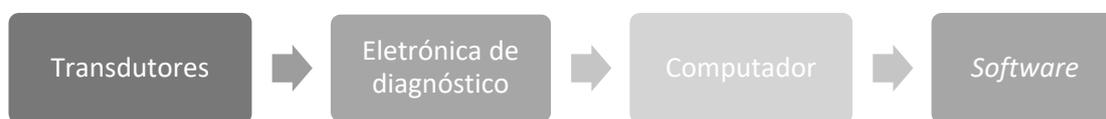


Figura 31 - Meios para execução da manutenção preditiva

3.4.2 ANÁLISE TÉCNICA

Estabelecidos os alertas de Manutenção e a composição de um sistema de manutenção preditiva, importa agora sintetizar os modelos que despoletarão os respetivos alertas, conforme foram explicados no capítulo 3.3. e seus subcapítulos 3.3.1 e 3.3.2.

Deste modo, os sinais provenientes dos sensores de Vibração e Emissões Acústicas serão analisados em dois domínios, do tempo e da frequência. Começando pelo modelo que explica o processo de análise no domínio do tempo, em que os parâmetros se aplicam à medição por Vibração e por Emissões Acústicas, este está representado na Figura 32 e também no anexo 2, para melhor visualização.

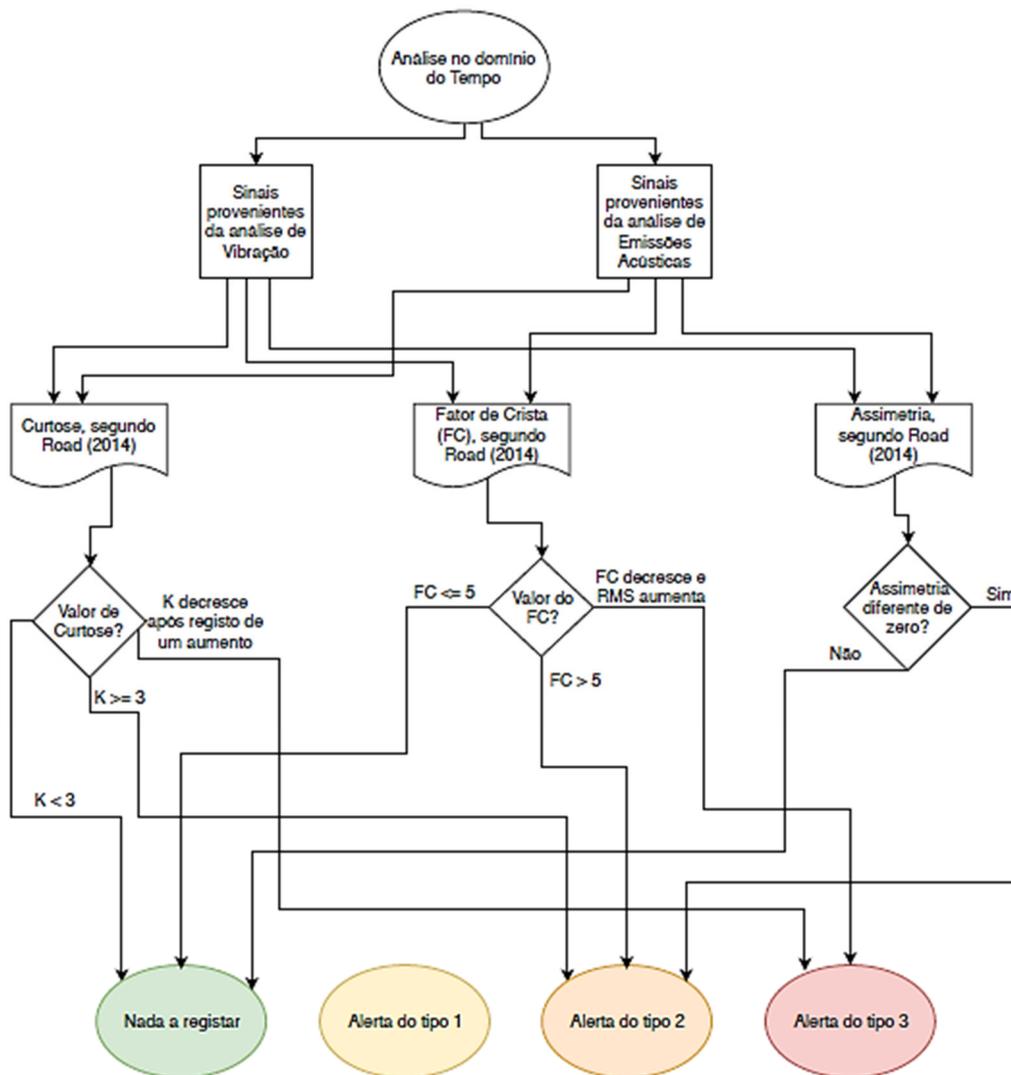


Figura 32 - Modelo de Manutenção com medição de Vibração e/ou Emissões Acústicas no domínio do tempo

O modelo seguinte, Figura 33, retrata também a análise no domínio do tempo, mas apenas aplicada à Vibração, com os limites estabelecidos através da norma SS 728000-1:2014. Neste caso, quando se analisa o RMS da velocidade dos sinais, esta indica a existência ou não de desequilíbrio e/ou desalinhamento do fuso, como referido em 3.3.2.2., que contribuem para o surgimento de defeitos nos rolamentos, daí a importância da sua monitorização. Este modelo encontra-se representado no anexo 3.

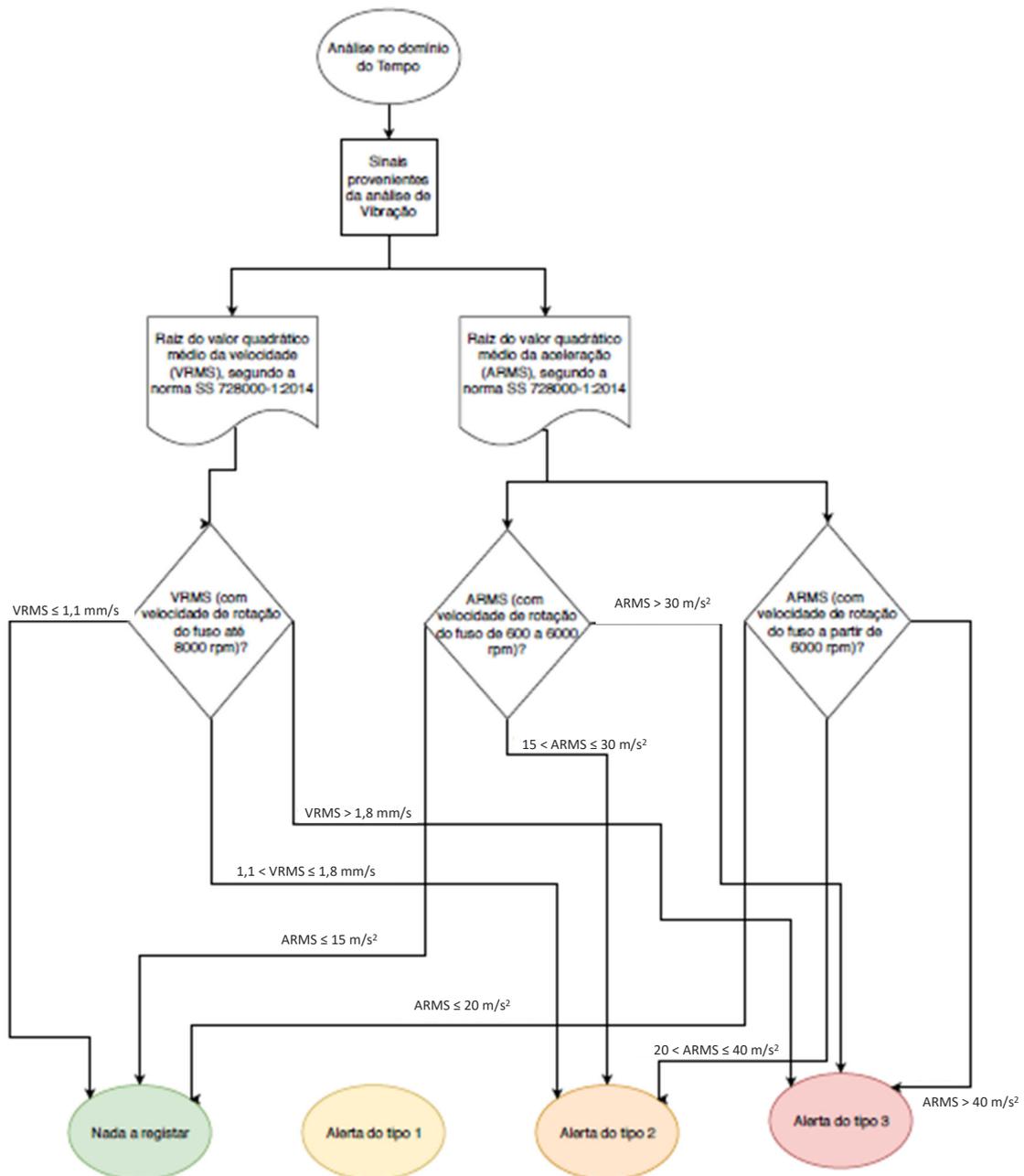


Figura 33 - Modelo de Manutenção com medição de Vibração no domínio do tempo

O último modelo de manutenção, Figura 34, diz respeito à análise por frequência, que recorre às equações fundamentais dos rolamentos (Nerella *and* Rao, 2018; Patidar and Mandloi, 2015; Road, 2014), recorrendo aos dois tipos de sinal. O anexo 4 apresenta este modelo, de forma mais clara.

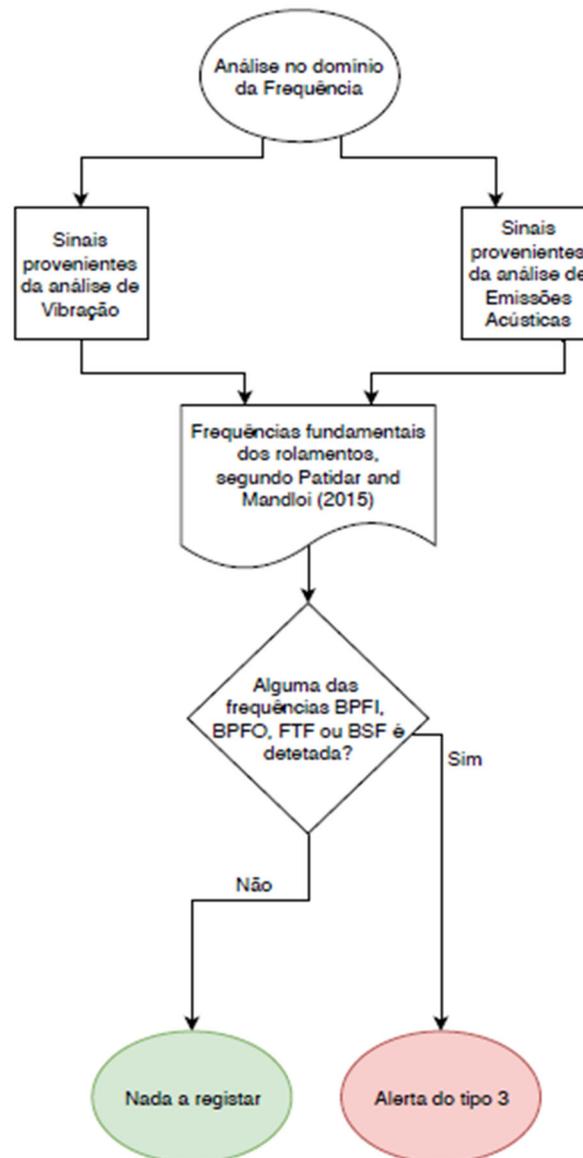


Figura 34 - Modelo de Manutenção com medição de Vibração e/ou Emissões Acústicas no domínio da frequência

Nestes modelos, o Alerta do tipo 1 não é despoletado por nenhum parâmetro. Como referido, este apenas poderá surgir com a análise das Emissões Acústicas, pois são estas que detetam os defeitos dos rolamentos na fase inicial, através da análise no domínio do tempo, recorrendo a parâmetros como a energia e as contagens. Na literatura, existe falta de informação dos limites que se podem estabelecer ou normas que os estabeleçam, Morhain *and* Mba (2003) e Nerella *and* Rao (2018) referem que o aumento da sua amplitude ao longo do tempo indica o surgimento de um defeito na fase inicial.

Relativamente ao sistema em si, começando pelo sistema de Vibração, foi elaborado o seguinte modelo e respetivas escolhas do modo como este será composto e realizado, de forma a alcançar os melhores resultados possíveis. Este encontra-se representado na Figura 35 e no anexo 5.

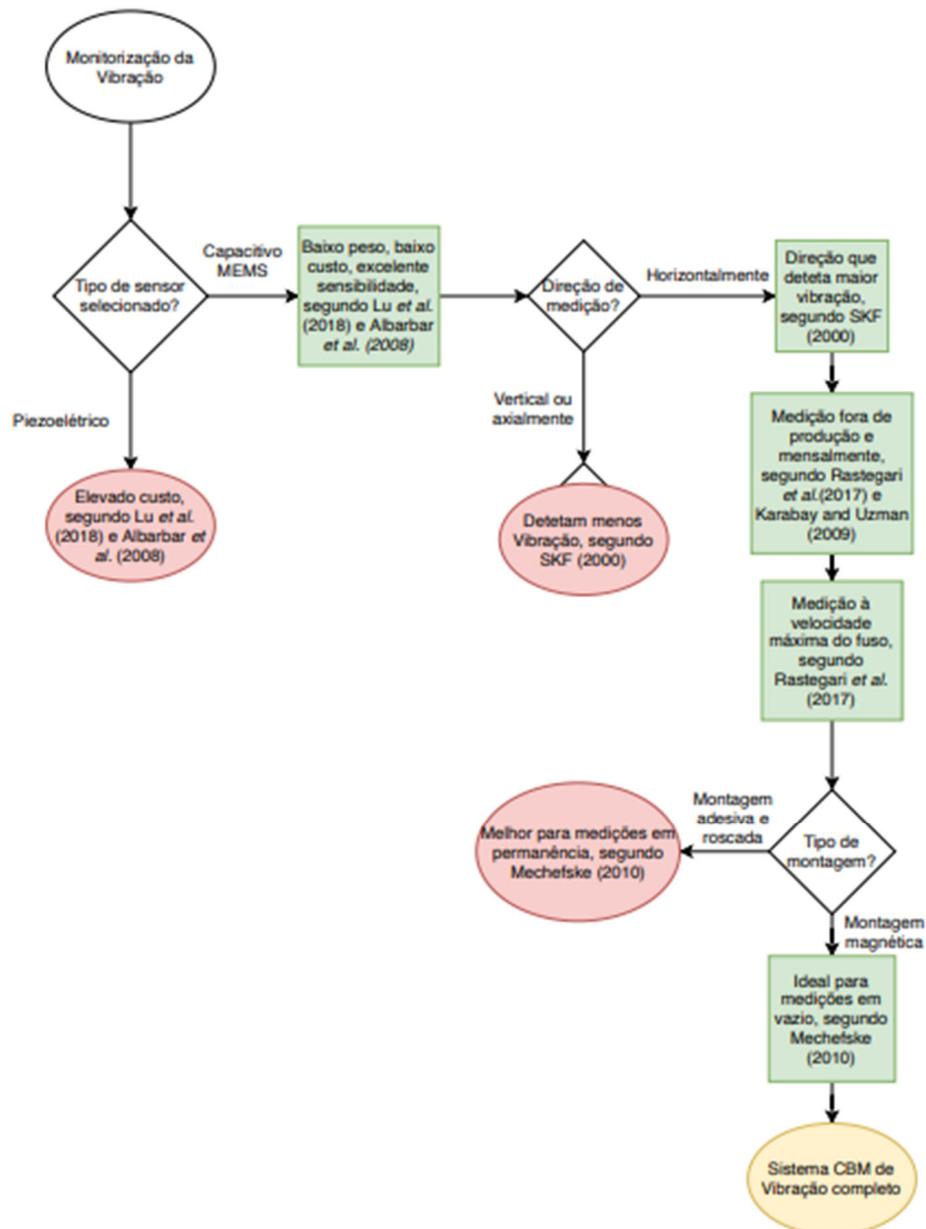


Figura 35 - Sistema CBM de Vibração

O Sistema CBM de Emissões Acústicas será implementado de igual forma, porém, o sensor aplicado será do tipo piezoelétrico, uma vez que é o mais utilizado e comprovado experimentalmente (Choudhury and Tandon, 2000).

3.4.3 ANÁLISE ECONÓMICA

Segundo Mobley (2016), a Figura 36 representa um gráfico típico da implementação da CBM.

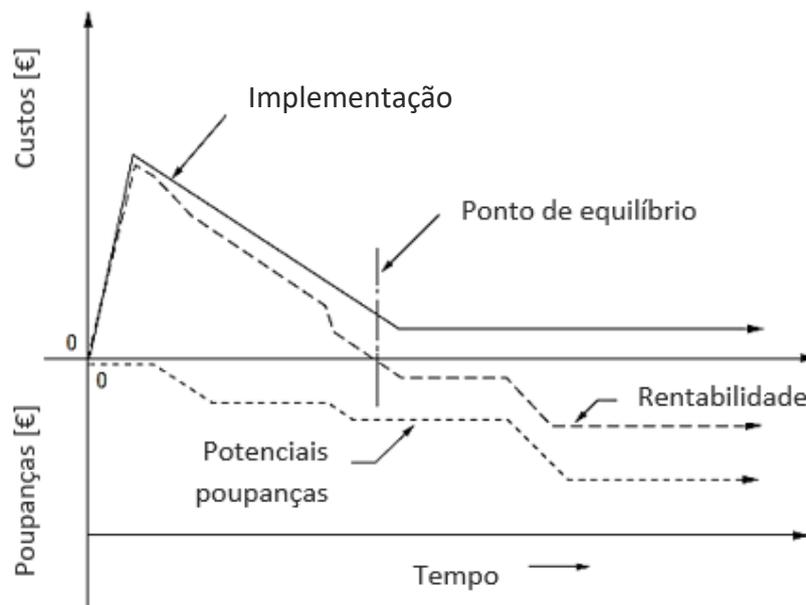


Figura 36 - Gráfico típico da implementação da CBM

Os custos de implementar esta estratégia são elevados, incluem a compra do equipamento, ou seja, transdutores e acessórios, eletrónica de diagnóstico/equipamentos de aquisição de dados e *softwares*, incluem por vezes a formação para que os técnicos de manutenção tenham o conhecimento necessário para compreender os dados do *software* e em que situações devem atuar, e abrangem também custos com o tempo despendido para analisar a melhor alternativa para a empresa, embora as empresas que comercializam estes sistemas possam ter esse conhecimento.

Após a implementação, o sistema começa a atuar de forma eficaz, se implementado corretamente, permitindo:

- Reduzir as atividades de manutenção desnecessárias;
- Prever as peças de reposição necessárias e em que momento;
- Reduzir os custos de elevados *stocks* de reposição e de compra de peças com urgência, a disponibilidade das máquinas aumenta;
- Reduzir os custos com a mão-de-obra de manutenção;

- Aumentar a produtividade;
- Reduzir o número de peças não conformes produzidas resultantes da má condição da máquina;
- Reduzir os custos devido ao seu retrabalho ou a produção extra destas peças.

Existem outras vantagens que não afetam diretamente os custos da empresa, mas que são fundamentais, como a fiabilidade e eficácia para com os seus clientes. Deste modo, o ponto de equilíbrio acontece quando o sistema se torna eficiente, e todos os custos que se preveem poupar começam a diminuir. A partir deste momento o sistema é rentável e permite à organização a poupança necessária para justificar o seu investimento.

3.5 DEFINIÇÃO TÉCNICA DA SOLUÇÃO

Depois de estudada a teoria acerca da CBM e sensorização, é necessário definir quais os componentes que devem ser incluídos num sistema de manutenção preditiva de fusos em CNC. Deste modo, o sistema será constituído por sensores de vibração e de emissões acústicas, que estarão ligados por um cabo de conexão à eletrónica de diagnóstico. Esta, por sua vez, estará ligada por cabo a um computador com o *software* que faz o processamento e análise dos sinais medidos pelos sensores e que foram recolhidos e filtrados pela eletrónica de diagnóstico. Caso se pretenda que este sistema esteja na rede para ser acessível a qualquer pessoa em qualquer lugar, é necessário um *software* extra no computador, estando este ligado por cabo de rede à eletrónica de diagnóstico.

Neste caso, escolheu-se a marca *IFM* [5] para implementar o sistema de monitorização. É fundamental ter em atenção que os dois sensores apenas podem utilizar a eletrónica de diagnóstico da *IFM* se o sensor de emissões acústicas for do tipo IEPE (*Integrated Electronics Piezo-Electric* - eletrónica integrada piezoelétrica) ou ICP (*Integrated Circuit Piezoelectric* - circuito piezoelétrico integrado), que é uma marca registada de sensores produzidos pela *IFM*. Caso contrário será necessário um dispositivo de aquisição de sinais independente da Vibração para as EA. Neste caso, a alternativa foi um processador de sinais da *Vallen* [6]. O modelo da Figura 37 representa o sistema CBM para o fuso. Este modelo encontra-se no anexo 6, para melhor visualização.

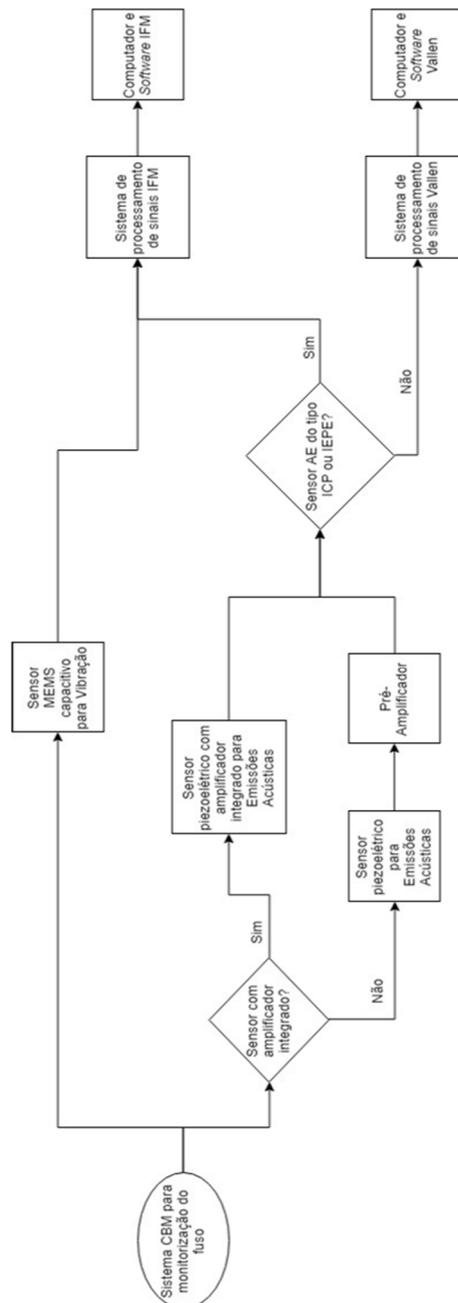


Figura 37 - Modelo do sistema CBM geral do fuso

Neste caso específico, o sensor de EA escolhido não é do tipo IEPE/ICP, ou seja, serão necessários dois processadores de sinal independentes para este sistema de monitorização. De seguida serão descritas as opções consideradas e a solução encontrada para este projeto.

3.5.1 SENSORES DE VIBRAÇÃO

Deste modo, optou-se por um acelerómetro capacitivo do tipo MEMS devido ao seu baixo custo, não necessitam de grandes técnicas de processamento, não variam com as alterações na temperatura e têm excelente sensibilidade. São, também, capazes de fazer medições de vibração quase estática e estática.

A Tabela 7 apresenta as 3 melhores opções de acelerómetros capacitivos MEMS da IFM [5].

Tabela 7 - Acelerómetro capacitivos MEMS IFM [5]

	VSA 001	VSA 002	VSA 004
			
TIPOLOGIA	MEMS capacitivo		
INTERVALO DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO [G]	-25 a 25 (-245 a 245 m/s ²)		
ESCALA DE FREQUÊNCIA [Hz]	0 a 6000	0 a 10000	
TEMPERATURA SUPORTADA [°C]	-30 a 125	-30 a 85	-30 a 80
TENSÃO DE OPERAÇÃO [V]	9		
PROTEÇÃO IP	IP 68; IP 69K	IP 67	
MTTF [ANOS]	1701	2642	2661
PESO [g]	50	87	120
MATERIAIS	Carcaça em aço inoxidável AISI 316L (baixo teor de carbono): ótima resistência ao desgaste, boa tenacidade, média maquinabilidade e má deformação.		
TIPO DE MONTAGEM	M8 x 1,25	M16 x 1,5	Parafuso de montagem M5
DIMENSÕES [mm]	Ø 18,5; L = 53	Ø 16; L = 22	Ø 18; L = 13,5
CUSTO [€]	156	228	217

A principal diferença entre estes três sensores está na gama de frequência, sendo que o VSA 002 e 004 tem maior gama, sendo mais adequado para monitorizar os rolamentos, e de entre estes dois, não havendo mais diferenças significativas, o VSA 004 é o escolhido pois é o mais económico e mais fácil de montar.

Apesar do tipo de montagem predefinido do VSA 004 ser através de parafuso, visto que a medição será mensal, a montagem magnética é a melhor solução. Para tal, utiliza-se uma base magnética como a da Figura 38.



Figura 38 - Base magnética para sensor [5]

Quanto às restantes, a montagem roscada compromete a estrutura da máquina e é um método mais caro e a montagem adesiva poderia ser a mais adequada caso se pretendesse uma monitorização permanente, o que não é o caso, pois não compromete a estrutura, através da furação, é mais económica, e com a aplicação de cera em vez de resina epóxi ou cola, a remoção é mais fácil.

A eletrónica de diagnóstico faz a ligação dos sensores ao computador. Nas entradas dinâmicas pode ser conectado um sinal de corrente analógico para monitorar valores do processo e, além disso, podem ser conectados até quatro sensores de vibração da *IFM* (tipo VSA, VSP) ou sensores com um sinal padrão IEPE ou ICP.

Tabela 8 - Eletrónica de diagnóstico IFM [5]

	VSE 002	VSE 100
		
QUANTIDADE DE ENTRADAS E SAÍDAS	Nº de entradas analógicas: 2; Nº de saídas digitais: 1; Nº de saídas analógicas: 1	Nº de entradas analógicas: 2; Nº de saídas digitais: 2; Nº de saídas analógicas: 1
INTERFACE DE COMUNICAÇÃO	Ethernet	
PROTOCOLO	TCP/IP	
TEMPERATURA AMBIENTE [°C]	0 a 70	
MTTF [ANOS]	101	89
PROTEÇÃO	IP 20	
TAMANHO DA MEMÓRIA	881664 registos	
MEMÓRIA HISTÓRICA	sim	
DIMENSÕES [mm]	100 x 25,4 x 103,4	114 x 50 x 105
PESO [g]	230	354,5
ESCALA DE FREQUÊNCIA [Hz]	0 a 12000	
MEMÓRIA DE DADOS ARMAZENADA	sim	
VERSÃO DA MEMÓRIA DE DADOS	memória cíclica; FIFO	
CUSTO [€]	538	697

Como o sensor de emissões acústicas selecionado não é do tipo IEPE ou ICP, este dispositivo apenas vai ser utilizado para a vibração, tal como referido anteriormente.

Deste modo os dois dispositivos apresentados na Tabela 8 apenas diferem em termos de número de saídas digitais, em termos dimensionais, no seu MTTF e no custo. O VSE

002 tem maior MTTF, é de menores dimensões e custo, apenas tem menos uma saída digital, o que não constitui um entrave à implementação proposta, sendo este o escolhido.

Para configurar e analisar os dados recolhidos com o sistema eletrónico de diagnóstico é necessário um *software* de parametrização. É neste *software* que se irão definir os objetos a monitorizar, rolamentos neste caso, conjuntamente com os parâmetros, velocidade RMS, aceleração RMS, Valor de Pico, Contagens, entre outros, respetivos limites e alertas que despoletará. Este *software* em específico dispõe de análise espectral FFT, análise de tendência e outras, e pode ter até 24 parâmetros diferentes de diagnóstico. Vem com um manual bastante pormenorizado de forma a facilitar a sua utilização.

Tabela 9 - *Software* de parametrização IFM [5]

VES 004	
REQUISITOS MÍNIMOS DE HARDWARE	
PROCESSADOR	Dual Core ou superior, frequência min 2 GHz
MEMÓRIA DE TRABALHO	2 GB
ESPAÇO DISPONÍVEL NO DISCO RÍGIDO	5 GB
REQUISITOS MÍNIMOS DE <i>SOFTWARE</i>	
SISTEMA OPERATIVO	Microsoft Windows XP SP3, Vista SP2, Windows 7 SP1, Windows 8
	Windows Server 2008 SP2, Windows Server 2008 R2 SP1, Windows Server 2012
CUSTO [€]	57,90

A *IFM* propõe, também, um *software* de aquisição de dados, sendo este opcional. É utilizado para armazenar e visualizar os dados recolhidos, sendo útil para formar uma rede onde se possam aceder aos dados e utilizar outros sistemas, como o SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition* – Sistema de supervisão e aquisição de dados).

Numa fase inicial este *software* pode não ser uma prioridade, e devido ao seu custo é admissível que só seja adquirido se a organização assim o entender e numa fase posterior à utilização experimental do restante sistema.

Tabela 10 - Software de aquisição de dados IFM [5]

VOS 001	
NÚMERO DE CONEXÕES	25
LÍNGUA	Alemão; Inglês
PORTADORA DE DADOS	CD-ROM
QUANTIDADE DAS CONEXÕES DO APARELHO	25
TIPO DE LICENÇA	Licença de usuário único
ESPECIFICAÇÃO SUPOSTADA	OPC data access (OPC DA)
TIPO DE CPU MÍNIMO	Pentium III
RAM MÍNIMO	2 GB
ESPAÇO NO DISCO RÍGIDO MÍNIMO	1 GB
PROTOCOLO DE REDE	Ethernet TCP/IP
SISTEMA DE OPERAÇÃO	Microsoft Windows XP; Microsoft Windows Vista; Microsoft Windows 7; Microsoft Server 2003; Microsoft Server 2008
CUSTO [€]	369,10

Além destes *hardwares* e *softwares* são necessários um cabo de rede (se se utilizar o *software* VOS 001) e um cabo de conexão.

Tabela 11 - Acessórios necessários para o sistema [5]

TIPO DE ACESSÓRIO	Código	Preço
CABO DE CONEXÃO 5 M	EVC 002	15,60 €
CABO DE CONEXÃO 10 M	EVC 003	19,00 €

Numa fase inicial, não se contemplará o *software* de aquisição de dados, pelas razões referidas anteriormente.

Deste modo, sintetizando, os *hardwares* e *softwares* selecionados e respetivos custos apenas para a monitorização através da vibração são os seguintes (Tabela 12):

Tabela 12 - Sistema de análise de Vibrações selecionado [5]

	Sensor	Eletrónica de diagnóstico	Software de parametrização	Cabo de conexão	Total
HARDWARE	VSA 004	VSE 002	VES 004	5 m	828,50
CUSTO [€]	217,00	538,00	57,90	15,60	€

As fichas técnicas dos equipamentos selecionados encontram-se nos anexos 7, 8 e 9, para o sensor, a eletrónica de diagnóstico e o *software* de parametrização, respetivamente.

3.5.2 SENSORES PARA EMISSÕES ACÚSTICAS

Como referido no capítulo 3.4.2, existem duas opções quanto ao sensor para emissões acústicas, com pré-amplificador integrado ou não. Segundo a *Vallen*, os sensores com pré-amplificador são por norma mais pesados e de maiores dimensões, porém as medições de *setup* são mais rápidas, exigem menores ligações entre equipamentos, facilitando a sua instalação em locais de menores dimensões e têm melhor relação custo-eficácia [7]. Neste caso, como não existe muito espaço no fuso para acoplar os equipamentos, a solução com integração do pré-amplificador foi a selecionada.

Assim sendo, a Tabela 13 apresenta três opções deste tipo de sensores, aptos para estarem em contacto com o óleo lubrificante.

Tabela 13 - Sensores piezoelétricos Vallen [8]

VALLEN SYSTEMS	VS150-WIC-V01	VS375-WIC-V01	VS900-WIC-V01
TIPOLOGIA	Piezoelétrico com pré amplificador incluído		
ESCALA DE FREQUÊNCIA [kHz]	100-450	250-700	100-900
TEMPERATURA SUPOSTADA [°C]	-40 a 85		
FONTE DE ENERGIA [V]	28±2		
PROTEÇÃO IP	IP 68, máximo 60 bar		
PESO [g]	184	181	
MATERIAIS	Carcaça em aço inoxidável AISI 316L (baixo teor de carbono): ótima resistência ao desgaste, boa tenacidade, média maquinabilidade e má deformação.		
GANHO DO PRÉ AMPLIFICADOR [dB]	34		
DIMENSÕES [mm]	Ø 32; H = 48		

Segundo a *Vallen*, o sensor para detecção de falhas em rolamentos, componente metálico, deve medir na amplitude de 100 a 400 kHz, sendo por isso o sensor VS150-WIC-V01 o que mais se adequa.

No caso do sistema de aquisição de dados, a *Vallen* sugere o seu sistema de aquisição de dados, ASCO-DAQ2, juntamente com o ASCO-PN1, que é um *hardware* utilizado em conjunto com a unidade de aquisição de dados, e que mais se adequa a monitorização dos rolamentos com o sensor selecionado. No manual de utilização do ASCO-DAQ2 encontra-se toda a informação necessária para a utilização deste sistema de monitorização de EA. O *software* está disponível para *download* no site da *Vallen*.

Neste caso, o sistema de monitorização por EA seria composto por:

Tabela 14 - Sistema CBM de AE

	SENSOR	SISTEMA AQUISIÇÃO DE DADOS	DE	CONEXÃO	SOFTWARE
MODELO	VS150- WIC-V01	ASCO- DAQ2	ASCO- PN1	Cabo USB com 2 m	

As fichas técnicas do sensor e do sistema de aquisição de dados ASCO-DAQ2 encontram-se nos anexos 11 e 12, respetivamente. No anexo 13 encontra-se o manual de utilização da *Vallen* para este sistema.

3.5.3 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

O *software* selecionado permite dois tipos de protocolos de comunicação, o TCP/IP e o DHCP. Estes dois protocolos são responsáveis pela transmissão de dados pela rede. Enquanto o primeiro se destina a configuração de IPs estática, o segundo permite uma configuração dinâmica.

Começando pelo TCP/IP, este diz respeito ao conjunto de protocolos de comunicação entre computadores em rede, sendo o acrónimo TCP referente a Protocolo de controlo de transmissão, e o acrónimo IP referente a Protocolo de *Internet*. O TCP/IP divide-se em várias etapas, que correspondem a protocolos, que em conjunto farão então a comunicação. Estas camadas estão representadas na Figura 39 (Badshah *et al.*, 2017; Rili, 2011).

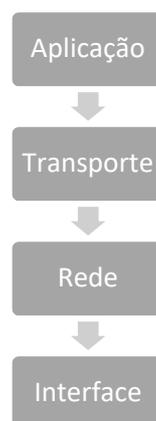


Figura 39 - Camadas do protocolo de comunicação TCP/IP (Badshah *et al.*, 2017; Rili, 2011)

Antes de explicar as camadas do TCP/IP é importante definir um datagrama. Um datagrama é um tipo de pacote no qual todas as informações estão roteadas, desde a origem ao destino, em vez de estarem em comutadores (Fall *and* Stevens, 2012).

A primeira camada é a de Aplicação. É esta camada que contacta com o ser humano e implementa o *software*. Para haver uma transferência de dados desta para a camada de transporte, é necessário haver uma linguagem normalizada, para esta última saber que informação está a receber e utilizar o protocolo adequado (Badshah *et al.*, 2017).

Existem quatro protocolos para a camada de transporte, são eles: o TCP (Protocolo de controlo de transmissão), o SCTP (Protocolo de transmissão de controle de fluxo), o DCCP (Protocolo de controle de congestionamento de datagrama) e o UDP (Protocolo de datagrama de utilizador) (Awang Nor, Alubady, *and* Abduladeem Kamil, 2017). O *software* dispõe de dois destes protocolos para a camada de Transporte: o TCP e o UDP.

Dentro dos protocolos de transporte, o TCP é o mais utilizado, sendo os seus pontos mais vantajosos a capacidade de reduzir a taxa em que faz a transmissão dos dados, ou seja, controla o congestionamento, e adapta o tempo de espera de confirmação, que noutros protocolos é estático (Ren *et al.*, 1998). Neste protocolo existe uma conexão que é estabelecida entre servidor e cliente, permitindo que a correta informação chegue ao destino correto, ao contrário do que pode acontecer com o UDP, pois não existe esta conexão (Badshah *et al.*, 2017).

O protocolo de transporte UDP tem a vantagem de ser simples e rápido. Por outro lado, não existe garantias de que a informação enviada chegue ao destino, e é a falta deste mecanismo de controlo que o torna mais rápido que o TCP (Rili, 2011).

É nesta camada que se adicionam os cabeçalhos aos dados, a sua origem e destino (Badshah *et al.*, 2017).

Na camada de rede, também diversos protocolos podem ser utilizados, sendo o mais comum o IP. Aqui são adicionados os cabeçalhos de ambos os dados da conexão, sendo depois esta informação utilizada para entrega dos dados ao remetente através de um roteador ou comutador (Badshah *et al.*, 2017).

Na camada de interface, a ligação pode ser feita por variados protocolos, dependendo do tipo de *hardware* que está a ser utilizado, como por exemplo pelo *Ethernet*, dos mais utilizados, do Protocolo ponto a ponto (PPP), do Protocolo da Internet em Série (SLIP), entre outros (Fall *and* Stevens, 2012).

A junção de todas estas camadas é o TCP/IP, e só assim é possível fazer a comunicação, conforme se pode observar na Figura 40 (Rili, 2011).

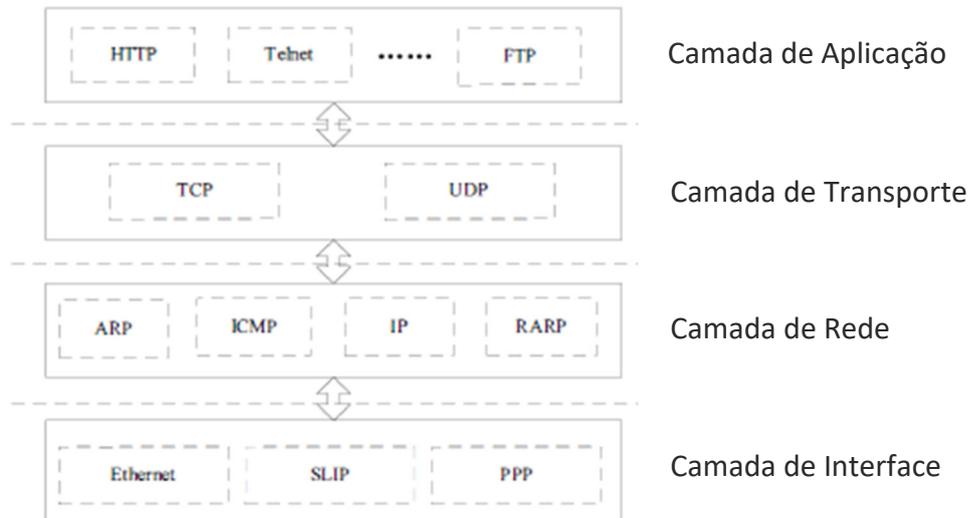


Figura 40 - Estrutura do protocolo TCP/IP (Rili, 2011)

Relativamente ao protocolo DHCP, protocolo de configuração dinâmica de endereços de rede, este é responsável por atribuir um IP exclusivo a cada cliente da rede (Rajput, Tewani, and Dubey, 2016). O seu funcionamento encontra-se representado na Figura 41 (Yaibuates and Chaisricharoen, 2014):

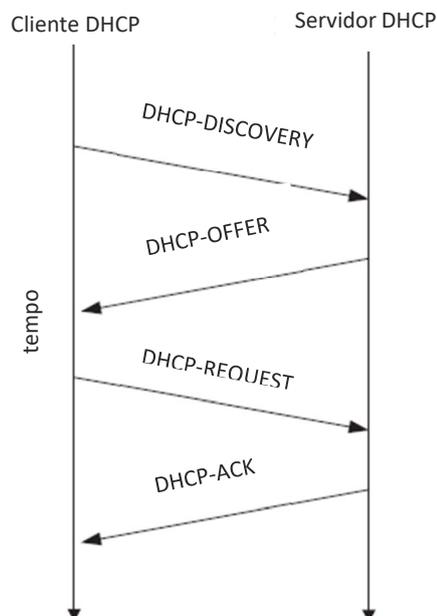


Figura 41 - Operação do protocolo DHCP (Yaibuates and Chaisricharoen, 2014)

Inicialmente, o cliente envia uma mensagem DHCP-DISCOVERY (Descoberta) à rede. Ao receber a mensagem, o servidor atribuirá um endereço IP disponível, devolvendo ao cliente a mensagem DHCP-OFFER (Oferta). Ao aceitar o endereço atribuído, o cliente envia a mensagem DHCP-REQUEST (Pedido). Por fim, de forma a que o cliente saiba que o endereço foi confirmado, o servidor envia a mensagem DHCP-ACK (*Acknowledgement* - Confirmação) (Rajput *et al.*, 2016; Yaibuates *and* Chaisricharoen, 2014). Este protocolo utiliza o UDP (Protocolo de datagrama de utilizador, descrito anteriormente) de forma a permitir que o DHCP funcione corretamente (Rajput *et al.*, 2016).

O *software* da IFM possibilita os dois protocolos mencionados, TCP/IP e DHCP, para que o cliente selecione o que mais se adequa ao seu sistema de monitorização.

3.6 MODELO DE FUNCIONAMENTO

O projeto piloto do sistema CBM para o torno suíço será então constituído por dois sensores acoplados magneticamente e na direção horizontal. O sensor de vibração será do tipo MEMS capacitivo e o sensor de emissões acústicas será piezoelétrico. O primeiro será instalado no ponto de medição 1 representado na Figura 42, como Cao *et al.* (2012) concluiu no seu estudo que era o melhor local de medição. O sensor de Emissões Acústicas será acoplado também o mais perto possível dos rolamentos, neste caso no ponto 2 (Figura 42). Como concluído no capítulo 3.4.2, a medição será realizada mensalmente e em vazio, ou seja, fora de produção, à velocidade de rotação máxima do fuso.

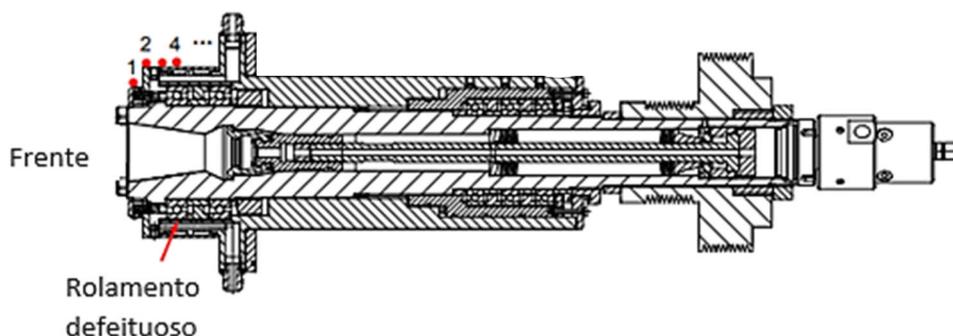


Figura 42 - Localização dos sensores de Vibração e Emissões Acústicas

Para ser possível tirar o maior partido deste sistema, é necessária a sua integração na rede local da empresa, permitindo que os diferentes departamentos envolvidos na Manutenção do equipamento possam saber o seu estado. Deste modo, quando os alertas de manutenção forem despoletados, os departamentos de manutenção, produção e compras serão automaticamente notificados, de forma a que as ações de manutenção sejam planeadas da melhor forma, sem interromper as produções, maximizando a vida útil dos componentes e eliminando as paragens não planeadas.

Este sistema de monitorização com integração com a rede local é vantajoso para pequenas empresas, onde só existe uma planta fabril, pode-se justificar uma ligação através da *Internet*, para que os dados da condição do equipamento possam ser acedidos a qualquer altura em qualquer local.

Deste modo, o modelo de funcionamento proposto está representado na Figura 43, e também se encontra no anexo 10.

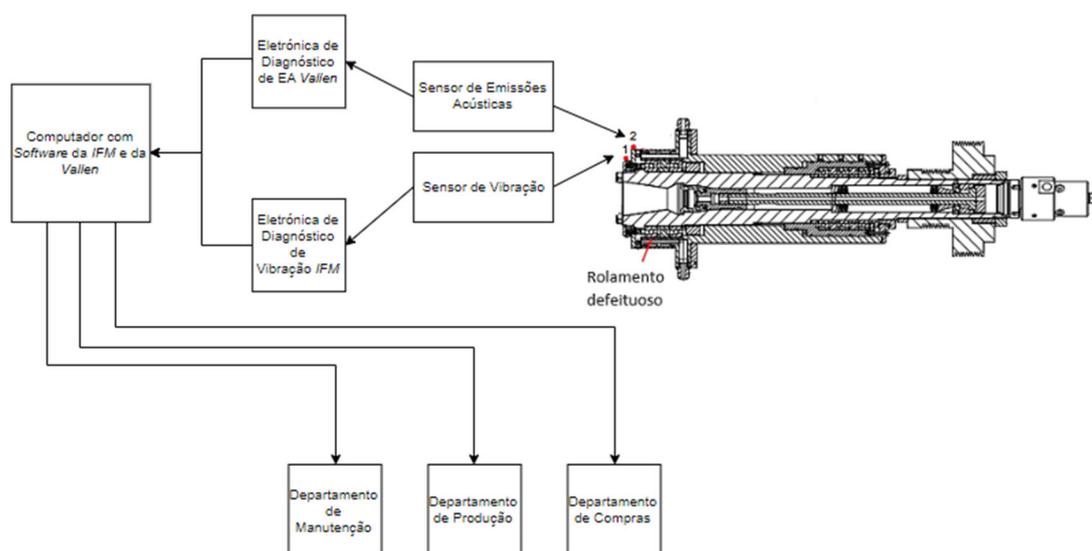


Figura 43 - Modelo de funcionamento proposto

Deste modo, a deteção de defeitos será feita da seguinte forma:

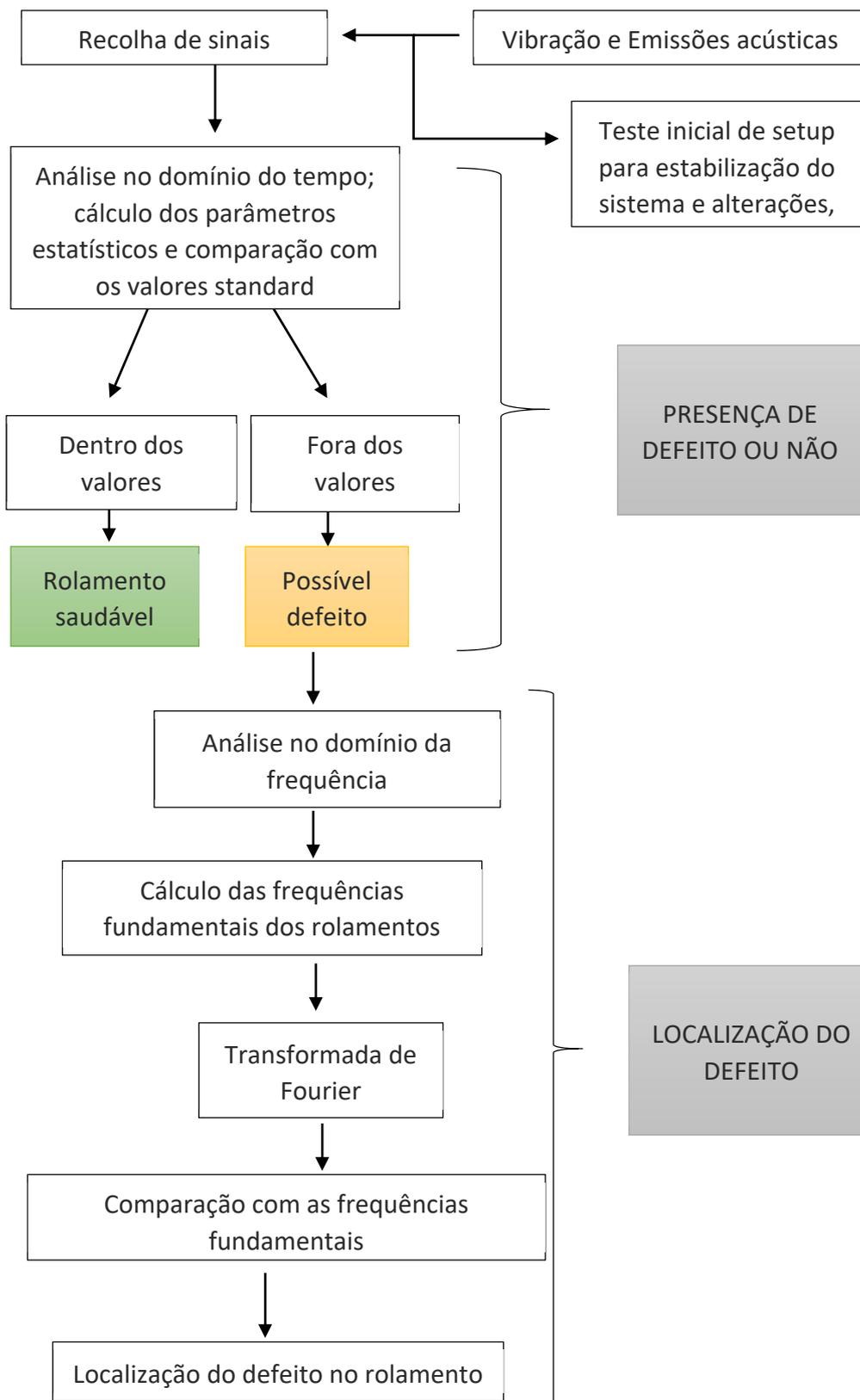


Figura 44 - Modelo de funcionamento

Deste modo, primeiro, após instalação de todos os equipamentos e *software*, e atribuição dos níveis de alerta de Manutenção conforme explicado, é realizado um teste inicial para estabilização do sistema, garantindo que esta foi corretamente efetuada. De seguida, os sensores recolhem os sinais, enviando-os aos sistemas de aquisição de dados. Estes, por sua vez, enviá-los-ão ao computador, onde estão instalados o *software* respetivos. Através de uma análise temporal e comparação com os valores *standard*, o programa informará acerca da possibilidade de presença ou não de um defeito no rolamento em análise. Caso se detete a possibilidade de existência do defeito, é realizada uma análise no domínio da frequência. Nesta análise, o *software* fará a comparação dos valores medidos com as frequências fundamentais do rolamento em estudo, de acordo com as suas características. Se alguma das frequências fundamentais estiver presente no sinal recolhido, então existe de facto um defeito e saber-se-á a sua localização, de acordo com a frequência fundamental que foi detetada.

Existe, também, a possibilidade de se utilizar apenas a Vibração ou as EA. Porém, tal não permite a obtenção de um diagnóstico tão fidedigno, pois, como explicado em 2.3.1., a primeira apenas deteta defeitos quando estes já surgiram à superfície, e as EA detetam-nos na fase inicial, sendo, por isso, fundamental a utilização dos dois (Nerella *and* Rao, 2018).

Após o alerta de Manutenção ser despoletado, é necessário agir. Assim sendo, se o alerta for do tipo 1, nada será alterado na monitorização do componente. No caso de o alerta ser do tipo 2, deverá ser ajustada a frequência de monitorização do rolamento para quinzenalmente, uma vez que foram detetados indícios do surgimento de defeitos. Por último, quando se trata do alerta do tipo 3, o Departamento de Produção é avisado, pois será necessária uma paragem da máquina para substituição do rolamento, e o Departamento de Compras terá que verificar se existe em *stock* um rolamento para substituição, procedendo à encomenda de um caso tal não se verifique. Este é o único alerta que gera uma Ordem de Trabalho para o Departamento de Manutenção, devido à sua severidade.

CONCLUSÕES

4.1 CONCLUSÕES

4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

Este subcapítulo tem como objetivo fazer uma descrição do problema e metodologia utilizada, apresentar os principais resultados obtidos e suas implicações no problema.

Como referido anteriormente, atualmente existe uma grande competitividade na indústria, e é por este motivo que a monitorização da condição é cada vez mais empregue como ferramenta de aumento da produtividade e redução de custos e paragens não planeadas. Neste sentido, foi proposto desenvolver um sistema para manutenção preditiva dos Tornos Suíços da empresa de acolhimentos, pois estes constituem uma grande porção da totalidade de máquinas presentes na fábrica. Dentro deste equipamento, eram os rolamentos o componente mais crítico, pois apesar do seu baixo custo, a sua falha comprometia o bom funcionamento da máquina.

Após se identificar o componente a estudar, definiu-se como variáveis para avaliar a sua condição as vibrações e as emissões acústicas, pois eram as que melhores resultados experimentais tinham no estudo deste componente. Foi proposto utilizar-se a análise no domínio do tempo e da frequência para avaliar os sinais recolhidos com os sensores, através de sistemas de aquisição de dados e software especializados.

Deste modo foi proposto o modelo de funcionamento da Figura 43.

Com base neste modelo de funcionamento e no problema presente na empresa de acolhimento, foi proposta a solução da Figura 42.

Com a pesquisa realizada, foi possível concluir que a implementação eficaz de um programa de manutenção preditiva implica um investimento inicial considerável, não só a nível económico, mas também a nível de tempo despendido a formar os colaboradores e a realizar a própria monitorização, que neste caso é feita fora da produção. Este investimento necessário nem sempre é possível, daí que muitas organizações continuem a optar por uma solução menos dispendiosa a curto prazo, mas que contrariamente à CBM, têm grandes custos a longo prazo.

Com a evolução industrial que se tem vivido, a manutenção preditiva adota soluções cada vez mais económicas e com equipamentos mais fiáveis, tornando-a numa solução viável para organizações de menor escala.

Apesar da solução proposta não ter sido implementada na empresa de acolhimento, os objetivos estipulados de desenvolvimento de uma solução eficaz foram alcançados. Como dito anteriormente, esta é uma solução que implica alguém especializado numa fase inicial, para introduzir no *software* os parâmetros a estudar e valores de referência adequados, bem como realizar inicialmente e de forma periódica alguns testes para verificação dos equipamentos, e implica também o investimento inicial na aquisição dos equipamentos.

Ao desenvolver esta dissertação foi possível adquirir competências ao nível da sensorização, que eram anteriormente desconhecidas, e que permitem agora ter uma visão diferente sobre a Manutenção e a sua gestão.

4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Como perspetiva de trabalhos futuros propõem-se:

- Implementação do trabalho proposto;
- Estender o raciocínio e metodologia desenvolvidos neste trabalho a outros componentes menos críticos deste tipo de equipamentos;
- Integrar os sinais resultantes de diferentes sistemas montados num mesmo equipamento;
- Interligar as mensagens emitidas pelo sistema desenvolvido com o software de manutenção comercial já existente;
- Com base no histórico existente, e naquele que vier a ser produzido após implementação, analisar as vantagens económicas e de gestão da produção trazidas pelo sistema desenvolvido.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 ARTIGOS EM REVISTAS INTERNACIONAIS

5.2 NORMAS

5.3 OUTROS

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 ARTIGOS EM REVISTAS INTERNACIONAIS

Abbass, J. (n.d.). A Comparative Study of Using Spindle Motor Power and Eddy Current for the Detection of Tool Conditions in Milling Processes. *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 766–770. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2015.7281833>

Abele, E., Altintas, Y., & Brecher, C. (2010). Machine tool spindle units. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(2), 781–802. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.002>

Ahuett-Garza, H., & Kurfess, T. (2018). A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing. *Manufacturing Letters*, 15, 60–63. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.011>

Albarbar, A., Mekid, S., Starr, A., & Pietruszkiewicz, R. (2008). Suitability of MEMS accelerometers for condition monitoring: An experimental study. *Sensors*, 8(2), 784–799. <https://doi.org/10.3390/s8020784>

Amodu, O. A., & Othman, M. (2018). Machine-to-Machine Communication: An Overview of Opportunities. *Computer Networks*, 145, 255–276. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.09.001>

Arslankaya, S., & Atay, H. (2015). Maintenance Management and Lean Manufacturing Practices in a Firm Which Produces Dairy Products. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 207, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.10.090>

Awang Nor, S., Alubady, R., & Abduladeem Kamil, W. (2017). Simulated performance of TCP, SCTP, DCCP and UDP protocols over 4G network. *Procedia Computer Science*, 111(2015), 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.002>

Badshah, F., Shah, S. T. U., Jan, S. R., & Ur Rahman, I. (2017). Communication between multiple processes on same device using TCP/IP suite. *Proceedings of 2017 International Conference on Communication, Computing and Digital Systems, C-CODE 2017*, 148–151. <https://doi.org/10.1109/C-CODE.2017.7918919>

Bae, S., Cha, H., & Suh, Y. (2009). *Study on Condition Based Maintenance Using On-Line Monitoring and Prognostics Suitable to a Research Reactor*. 1–5.

Barbosa, M., Silva, F. J. G., Pimentel, C., & Gouveia, R. M. (2018). A Novel Concept of CNC

- Machining Center Automatic Feeder. *Procedia Manufacturing*, 17, 952–959. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.111>
- Bengtsson, M., & Lundström, G. (2018). On the importance of combining “the new” with “the old” – One important prerequisite for maintenance in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 25, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.065>
- Cao, H., Niu, L., & He, Z. (2012). Method for vibration response simulation and sensor placement optimization of a machine tool spindle system with a bearing defect. *Sensors (Switzerland)*, 12(7), 8732–8754. <https://doi.org/10.3390/s120708732>
- Chan, F. T. S., Lau, H. C. W., Ip, R. W. L., Chan, H. K., & Kong, S. (2005). Implementation of total productive maintenance: A case study. *International Journal of Production Economics*, 95(1), 71–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.10.021>
- Chaudhury, S. B., Sengupta, M., & Mukherjee, K. (2014). Vibration Monitoring of Rotating Machines Using MEMS Accelerometer. *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER) ISSN (Online, 2(9), 2347–3878*. <https://doi.org/10.1177/13591835030083002>
- Chen, J. (1993). *Applications of the Wavelet Transform to Signal Analysis Applications of the Wavelet Transform to Signal Analysis*.
- Chhetri, S. R., Faezi, S., Rashid, N., & Al Faruque, M. A. (2017). Manufacturing Supply Chain and Product Lifecycle Security in the Era of Industry 4.0. *Journal of Hardware and Systems Security*, 2(1), 51–68. <https://doi.org/10.1007/s41635-017-0031-0>
- Choudhury, A., & Tandon, N. (2000). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, 32(1999), 469–480.
- De Castelbajac, C., Ritou, M., Laporte, S., & Furet, B. (2014). Monitoring of distributed defects on HSM spindle bearings. *Applied Acoustics*, 77, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.07.008>
- Dhami, S. S., Pabla, B. S., Kumar, S., Goyal, D., & Dang, R. K. (2018). Condition based maintenance of bearings and gears for fault detection – A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6128–6137. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.219>
- Dinardo, G., Fabbiano, L., & Vacca, G. (2018). A smart and intuitive machine condition monitoring in the Industry 4.0 scenario. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 126(January), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.041>
- EN 13306. (2010). *EN 13306 Maintenance - Maintenance terminology*. 1–31.
- Fall, K. R., & Stevens, W. R. (2012). *TCP/IP Illustrated. 1*, 1059.
- Ferreira, S., Casais, F. J. G. S. R. B., Pereira, M. T., & Ferreira, L. P. (2019). KPI development and obsolescence management in industrial maintenance. *Procedia Manufacturing*, (Aceite para publicação. Em produção.)
- Freitas, C., Cuenca, J., Morais, P., Ompusunggu, A., Sarrazin, M., & Janssens, K. (2016). *Comparison of vibration and acoustic measurements for detection of bearing*

defects.

- Geissbauer, B. Y. R., & Schrauf, S. (2016). *A Strategist's Guide to Industry 4.0.* (83).
- Guariente, P., Antonioli, I., Ferreira, L. P., Pereira, T., & Silva, F. J. G. (2017). Implementing autonomous maintenance in an automotive components manufacturer. *Procedia Manufacturing*, 13, 1128–1134. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.174>
- Gulati, R., & O'Hanlon, T. (2013). *Maintenance and reliability best practices.*
- Gupta, P., & Pradhan, M. K. (2017). Fault detection analysis in rolling element bearing: A review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2085–2094. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.054>
- He, Y., Zhang, X., & Friswell, M. I. (2009). Defect Diagnosis for Rolling Element Bearings Using Acoustic Emission. *Journal of Vibration and Acoustics*, 131(6), 061012. <https://doi.org/10.1115/1.4000480>
- Heloisa, N., Goulart, B., Correia, S., Simone, D., Feliciano, V., & Raposo, F. P. (2016). *PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM UMA EMPRESA DE PEQUENO PORTE DO RAMO DE FABRICAÇÃO DE FRALDAS.*
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
- Karabay, S., & Uzman, I. (2009). Importance of early detection of maintenance problems in rotating machines in management of plants: Case studies from wire and tyre plants. *Engineering Failure Analysis*, 16(1), 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.03.003>
- Kiangala, K. S., & Wang, Z. (2018). Initiating predictive maintenance for a conveyor motor in a bottling plant using industry 4.0 concepts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9–12), 3251–3271. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2093-8>
- Kobbacy, K. A. H., & Murthy, D. N. P. (2008). *Complex System Maintenance Handbook.* Springer US.
- Kovač, P., & Mankova, I. (2011). A review of machining monitoring systems. *Journal of Production ...*, 11(1), 8–13.
- Li, Q., & Pi, Z. (2011). Research on spindle bearings state recognition of CNC milling machine based on noise monitoring. *Proceedings of the 2011 2nd International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2011*, 1019–1021. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2011.252>
- Lu, Y. S., Wang, H. W., & Liu, S. H. (2018). An integrated accelerometer for dynamic motion systems. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 125(March), 471–475. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.019>

Márquez, A. C. (2007). *The Maintenance Management Framework Models and Methods*

- for Complex Systems Maintenance*. Springer US.
- Martínez, J. C. (n.d.). *Manutenção na Indústria 4.0: ativos inteligentes, conexões cloud e manutenção preditiva*.
- Martinho, B., Galvão, J., Costa, E., Vale Lima, F., Oliveira e Sá, J., Santos, M. Y., ... Costa, C. (2017). A Big Data system supporting Bosch Braga Industry 4.0 strategy. *International Journal of Information Management*, 37(6), 750–760. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.07.012>
- Mba, D., & Rao, R. B. K. N. (2006). Development of acoustic emission technology for condition monitoring and diagnosis of rotating machines: Bearings, pumps, gearboxes, engines, and rotating structures. *Shock and Vibration Digest*, 38(1), 3–16. <https://doi.org/10.1177/0583102405059054>
- Mechefske, C. (2010). *Machine Condition Monitoring and Fault Diagnostics*. 25-1-25–35. <https://doi.org/10.1201/9781420039894.ch25>
- Mobley, R. K. (2016). An Introduction to Predictive Maintenance. In *An Introduction to Predictive Maintenance*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7531-4.x5000-3>
- Moreira, A., Silva, F. J. G., Correia, A. I., Pereira, T., Ferreira, L. P., & De Almeida, F. (2018). Cost reduction and quality improvements in the printing industry. *Procedia Manufacturing*, 17, 623–630. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.107>
- Morhain, A., & Mba, D. (2003). Bearing defect diagnosis and acoustic emission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 217(4), 257–272. <https://doi.org/10.1243/135065003768618614>
- Moubray. (1992). *Reliability centred maintenance*.
- Mwanza, B. G., & Mbohwa, C. (2015). Design of a Total Productive Maintenance Model for Effective Implementation: Case Study of a Chemical Manufacturing Company. *Procedia Manufacturing*, 4(less), 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.063>
- Nerella, M. J., & Rao, V. V. (2018). *Fault Diagnosis of a Rolling Element Bearings Using Acoustic Condition Monitoring and Artificial Neural Network Technique*.
- Paolanti, M., Romeo, L., Felicetti, A., Mancini, A., Frontoni, E., & Loncarski, J. (2018). Machine Learning approach for Predictive Maintenance in Industry 4.0. *2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, MESA 2018*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/MESA.2018.8449150>
- Pascal, V., Toufik, A., Manuel, A., Florent, D., & Frédéric, K. (2019). Improvement indicators for Total Productive Maintenance policy. *Control Engineering Practice*, 82(June 2018), 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.09.019>
- Patidar, H., & Mandloi, R. K. (2015). *Study of detection of defects in rolling element bearings using vibration and acoustic measurement methods- A Review*. 1(1), 110–116.
- Pereira, A. C., & Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the

- Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206–1214. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.032>
- Pinto, B., Silva, F. J. G., Costa, T., Campilho, R. D. S. G., & Pereira, M. T. (2019). A Strategic Model to take the First Step Towards Industry 4.0 in SMEs. *Procedia Manufacturing*, (Aceite para publicação. Em produção.)
- Rajput, A., Tewani, R., & Dubey, A. (2016). *The Helping Protocol "DHCP."* 634–637.
- Rao, V. V., & Ratnam, C. (2015). A comparative experimental study on identification of defect severity in rolling element bearings using acoustic emission and vibration analysis. *Tribology in Industry*, 37(2), 176–185.
- Rastegari, A. (2019). Vibration analysis of machine tool spindle units. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (August), 511–522. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_51
- Rastegari, A., Archenti, A., & Mobin, M. (2017). Condition based maintenance of machine tools: Vibration monitoring of spindle units. *Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium*, (August 2018). <https://doi.org/10.1109/RAM.2017.7889683>
- Ren, W., Siu, K. Y., Suzuki, H., & Ramamurthy, G. (1998). Performance of TCP in IP/ATM internetworks. *Computer Communications*, 21(17), 1610–1623. [https://doi.org/10.1016/S0140-3664\(98\)00226-6](https://doi.org/10.1016/S0140-3664(98)00226-6)
- Rili, H. (2011). Research and application of TCP/IP protocol in embedded system. *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks, ICCSN 2011*, 584–587. <https://doi.org/10.1109/ICCSN.2011.6014961>
- Road, W. (2014). *Comprehensive bearing condition monitoring algorithm for incipient fault detection using acoustic emission Mechanical Engineering Department , SVPCET , RTM Nagpur University , Gavasi TGPCET , RTM Nagpur University Kh . No . 8 / 1 , Mahgaon , Wardha Road N. 2*(July), 1–30.
- Sandoval, H. M. U., & Ramirez, C. A. P. (2013). *Acoustic emission-based early fault detection in tapered roller bearings Detección de fallas de rodamientos cónicos usando emisiones acústicas*. 33(3), 5–10.
- Santos, T., Silva, F. J. G., Ramos, S. F., Campilho, R. D. S. G., & Ferreira, L. P. (2019). Asset Priority Setting for Maintenance Management in the Food Industry. *Procedia Manufacturing*, Aceite par.
- Scheffer, Cornelius, & Girdhar, P. (2004). *Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance* (C. Scheffer, ed.). Newnes.
- Shakya, P., Darpe, A. K., & Kulkarni, M. S. (2013). Vibration-based fault diagnosis in rolling element bearings: ranking of various time, frequency and time-frequency domain data-based damage identification parameters. *International Journal of Condition Monitoring*, 3(2), 53–62. <https://doi.org/10.1784/204764213808146626>
- Simões, J. M., Gomes, C. F., & Yasin, M. M. (2016). Changing role of maintenance in business organisations: Measurement versus strategic orientation. *International*

- Journal of Production Research*, 54(11), 3329–3346.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1106611>
- Singh, R., Gohil, A. M., Shah, D. B., & Desai, S. (2013). Total productive maintenance (TPM) implementation in a machine shop: A case study. *Procedia Engineering*, 51(NUICONE 2012), 592–599. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.084>
- SKF. (2000). *SKF - Vibration Diagnostic Guide*. Retrieved from [http://edge.rit.edu/edge/P14453/public/Research/SKF VibrationGuide.pdf](http://edge.rit.edu/edge/P14453/public/Research/SKF%20VibrationGuide.pdf)
- Smith, R., & Mobley, R. K. (2003). *Industrial Machinery Repair*. Elsevier Science.
- Tait, T. F. C., Pacheco, R. C. S., & Abreu, A. F. de. (2010). Arquitetura de sistemas de informação: evolução e análise comparativa de modelos. *Production*, 9(1), 55–63. <https://doi.org/10.1590/s0103-65131999000100006>
- Thames, L., & Schaefer, D. (2016). Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 52, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.041>
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 - A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- Vanraj, Goyal, D., Saini, A., Dhami, S. S., & Pabla, B. S. (2016). Intelligent predictive maintenance of dynamic systems using condition monitoring and signal processing techniques-A review. *Proceedings - 2016 International Conference on Advances in Computing, Communication and Automation, ICACCA 2016*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICACCA.2016.7578870>
- Vasconcelos, A., Caetano, A., Sinogas, P., Mendes, R., & Tribolet, J. (1998). *Arquitetura de Sistemas de Informação : A Ferramenta de Alinhamento Negócio / Sistemas de Informação ? * Alinhamento Negócio / Sistemas de Informação*.
- Vasconcelos, A., Sousa, P., & Tribolet, J. (n.d.). *Um perfil para modelação de Arquitecturas dos Sistemas de Informação*.
- Vogl, G. W., Weiss, B. A., & Helu, M. (2019). A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(1), 79–95. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1228-8>
- Yaibuates, M., & Chairicharoen, R. (2014). ICMP based malicious attack identification method for DHCP. *JICTEE 2014 - 4th Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/JICTEE.2014.6804073>
- Zhang, H., Kang, R., & Pecht, M. (2009). A hybrid prognostics and health management approach for condition-based maintenance. *IEEM 2009 - IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1165–1169. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2009.5372976>
- Zhou, W., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2007). Bearing condition monitoring methods for electric machines: A general review. *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED*, 3–6. <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2007.4393062>

5.2 NORMAS

EN 13306:2010

SS 728000-1:2014

ISO 230:2012

ISO 17359:2002

5.3 OUTROS

[1] - <http://www.ni.com/white-paper/3807/pt/> acedido a 19/2/2019

[2] - http://www.pcb.com/contentstore/MktgContent/IMI_Downloads/IMICat-0812-Complete_LowRes.pdf - PCB Piezotronics - Machine Tool Spindles, acedido a 6/2/2019 – página 60

[3] - <http://www.sisma.pt/>, acedido a 20/1/2019

[4] - <http://www.aem.pt/sisma/>, acedido a 20/1/2019

[5] - <https://www.ifm.com/pt/pt>, acedido a 29/5/2019

[6] - <http://www.vallen.de/products/sensors/>, acedido a 29/5/2019

[7] - <http://www.vallen.de/zdownload/pdf/sov.pdf>, acedido a 29/5/2019

[8] - <http://www.vallen.de/products/sensors/>, acedido a 29/5/2019

[9] - <https://www.fg.com.br/rolamento-de-esferas-de-contato-angular-7208-cdga-p4a--skf/p>, acedido a 25/3/2019

[10] - <https://www.shutterstock.com/pt/image-vector/big-iceberg-floating-on-water-waves-622143410>, acedido a 28/3/2019

ANEXOS

6 ANEXOS

6.1 ANEXO 1

ISO/FDIS 17359:2002(E)

Annex A (informative)

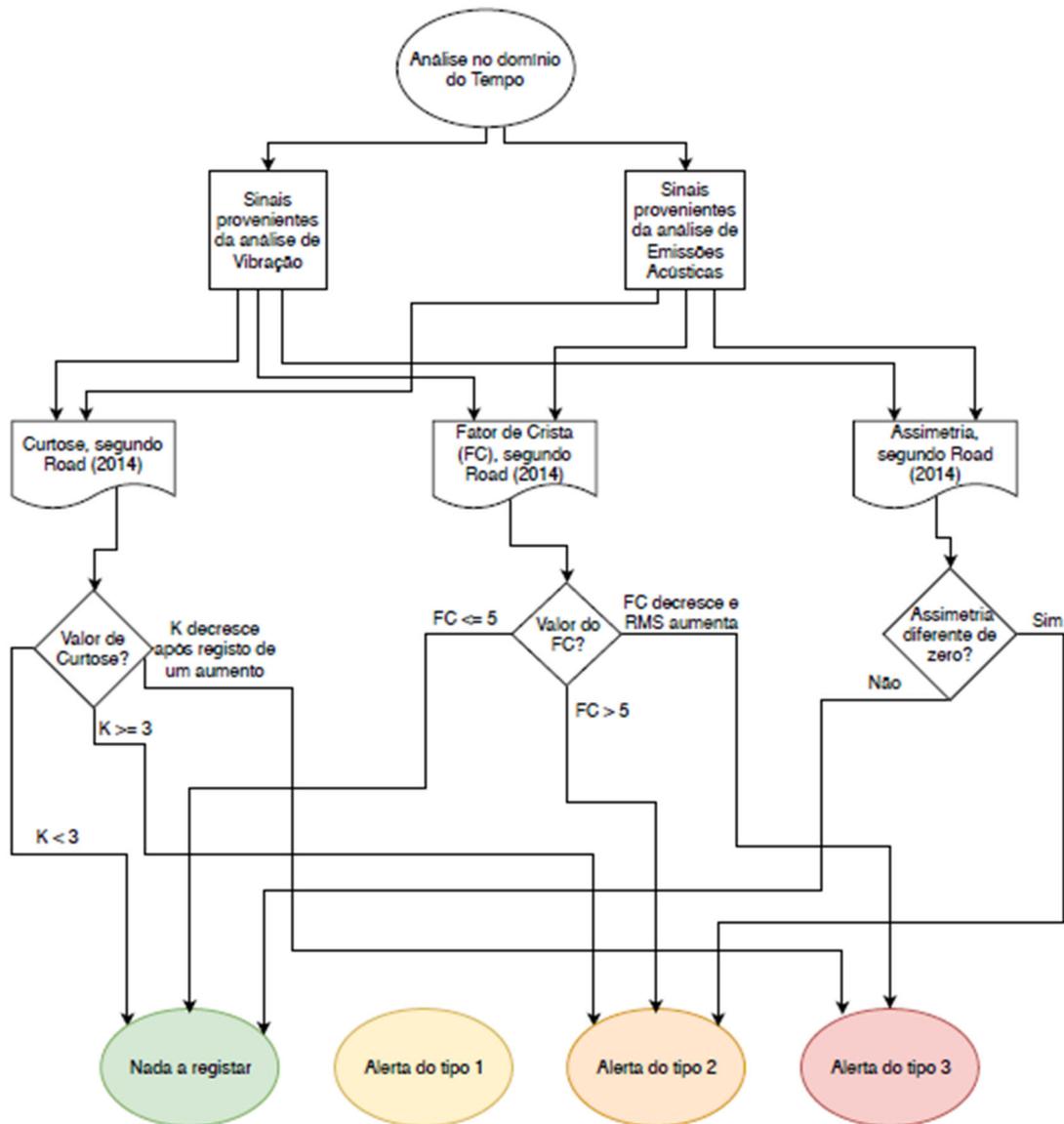
Examples of condition monitoring parameters

Table A.1 — Examples of condition monitoring parameters by machine type

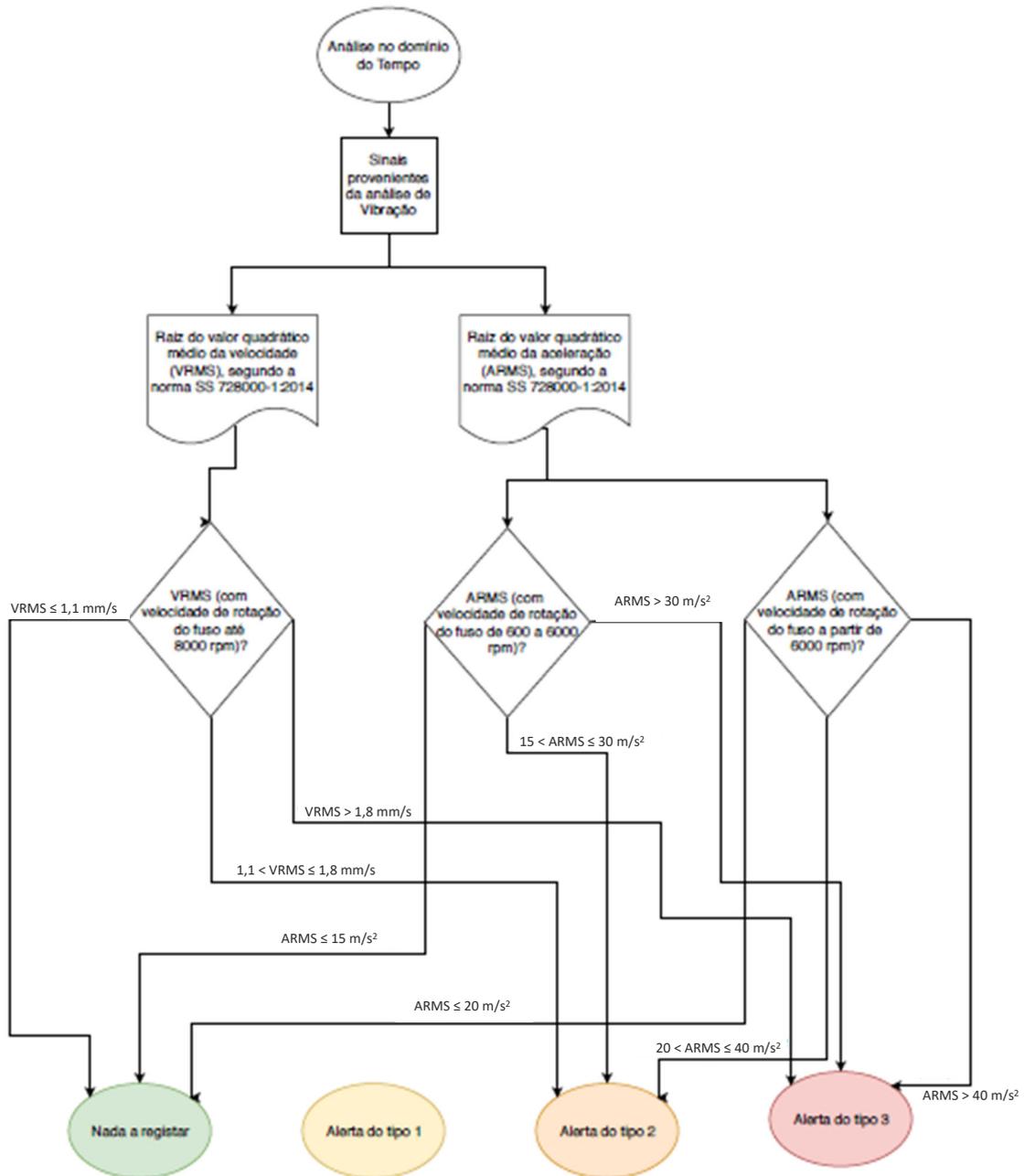
Parameter	Machine Type								
	Electric motor	Steam turbine	Aero gas turbine	Industrial gas turbine	Pump	Compressor	Electric generator	RIC engine	Fan
Temperature	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Pressure		*	*	*	*	*		*	*
Pressure (head)					*				
Pressure ratio			*	*		*			
Air flow			*	*		*		*	*
Fuel flow			*	*				*	
Fluid flow		*			*	*			
Current	*						*		
Voltage	*						*		
Resistance	*						*		
Input power	*				*	*	*		*
Output power	*	*	*	*			*	*	
Noise	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Vibration	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Acoustic techniques	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Oil pressure	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Oil consumption	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Oil (tribology)	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Torque	*	*		*		*	*	*	
Speed	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Length		*							
Efficiency (derived)		*	*	*	*	*	*	*	

* indicates condition monitoring measurement parameter applicable

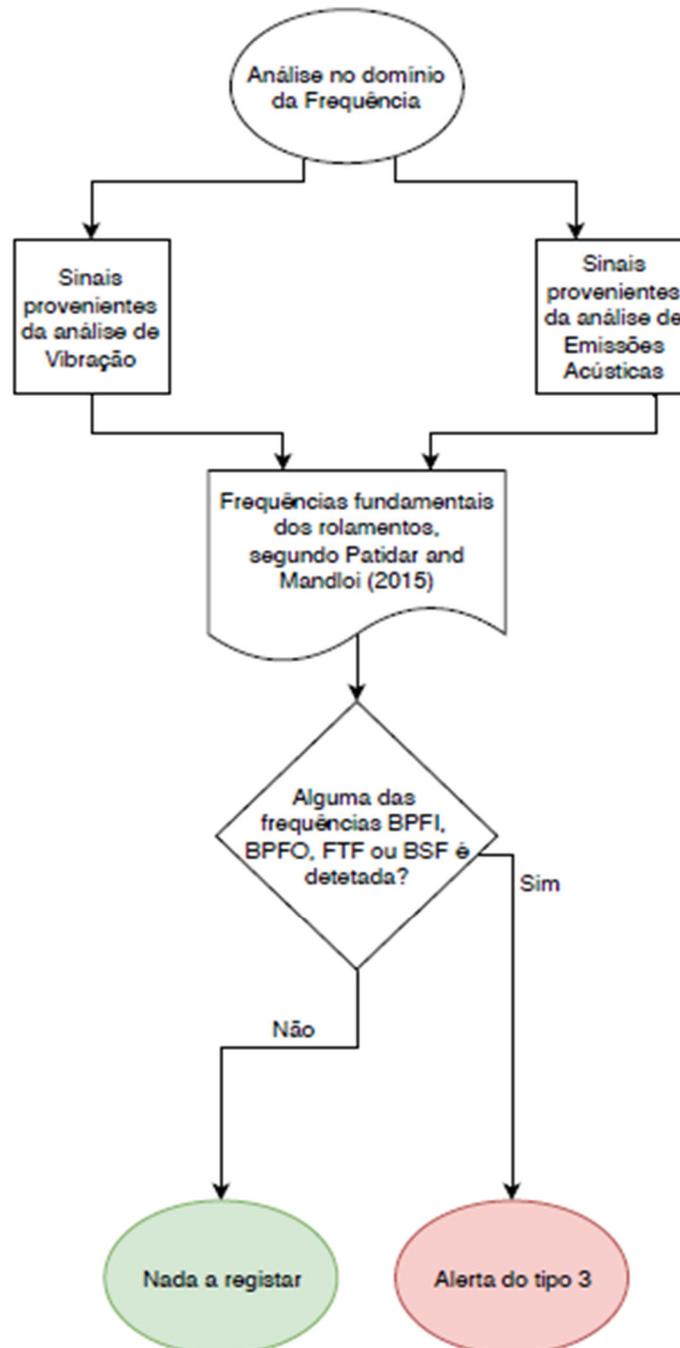
6.2 ANEXO 2



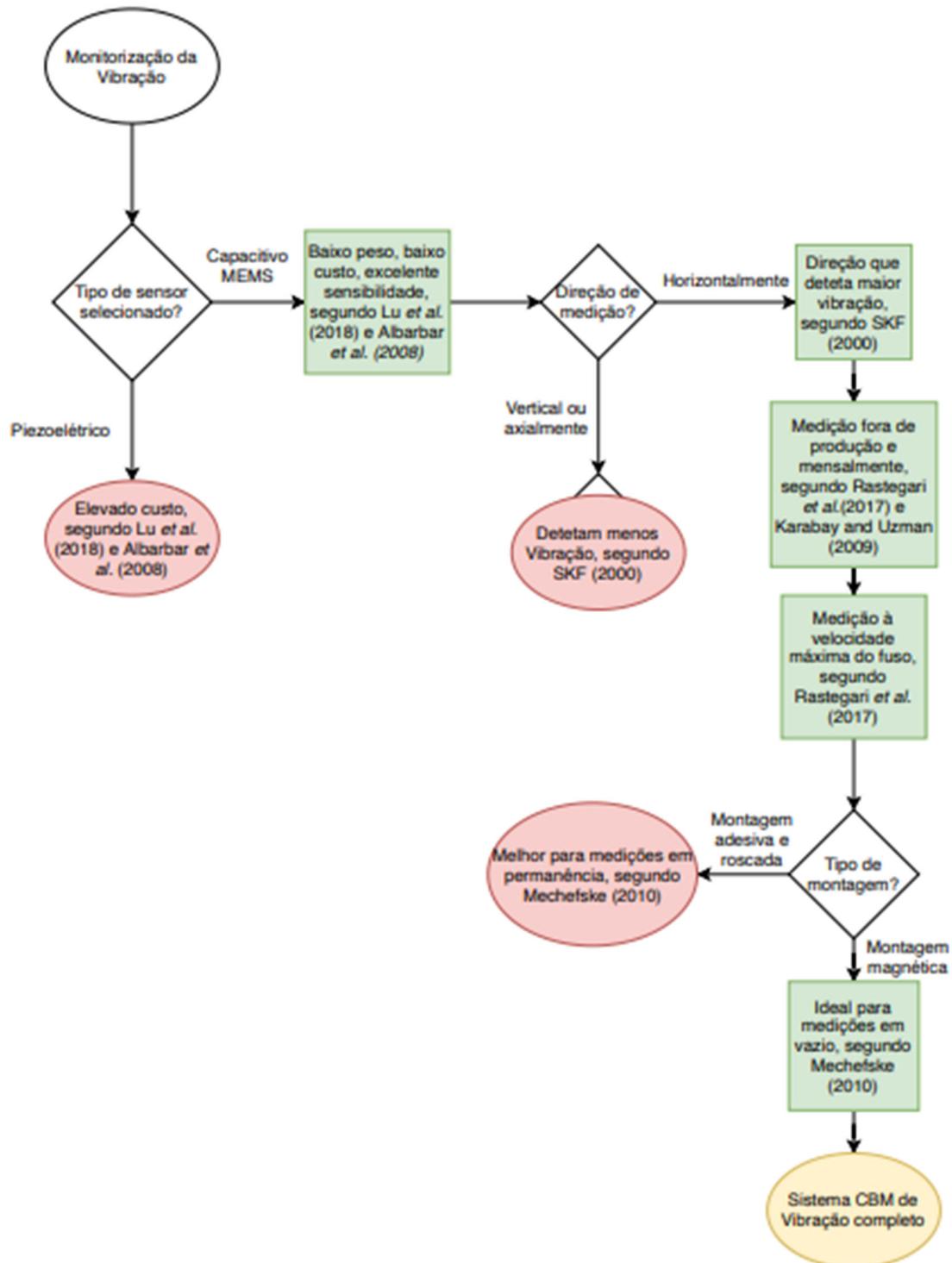
6.3 ANEXO 3



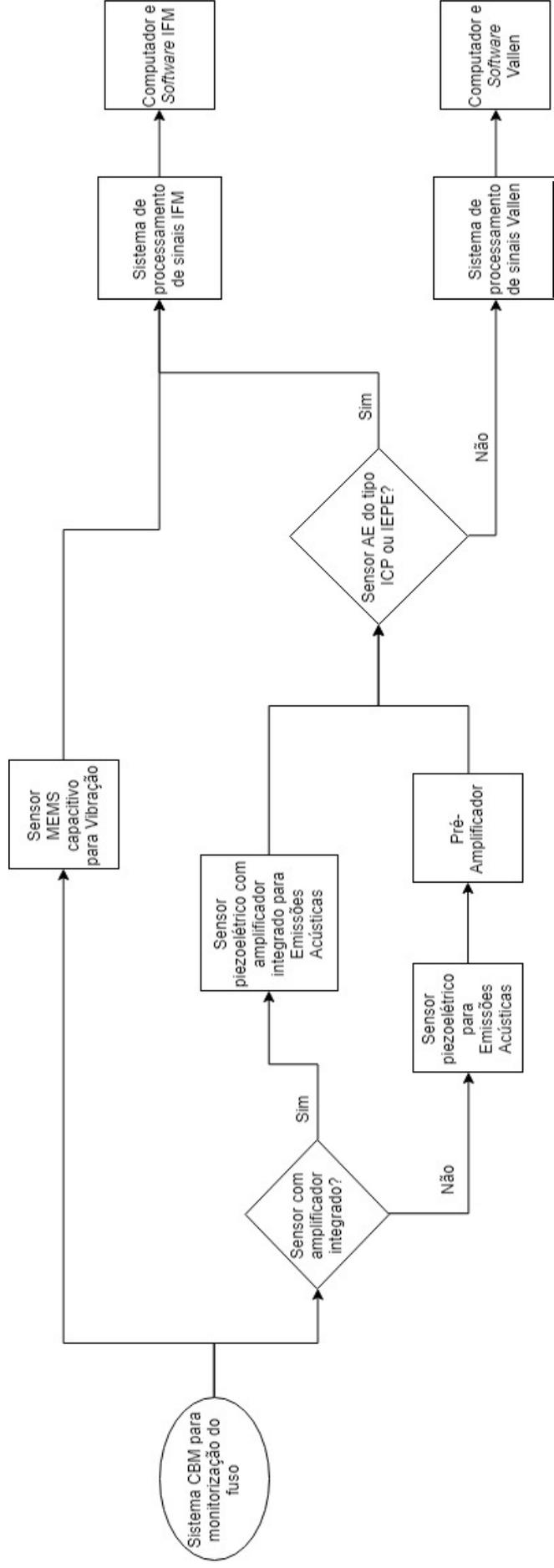
6.4 ANEXO 4



6.5 ANEXO 5



6.6 ANEXO 6



6.7 ANEXO 7

Ficha Técnica do sensor de Vibração MEMS capacitivo da *IFM*.

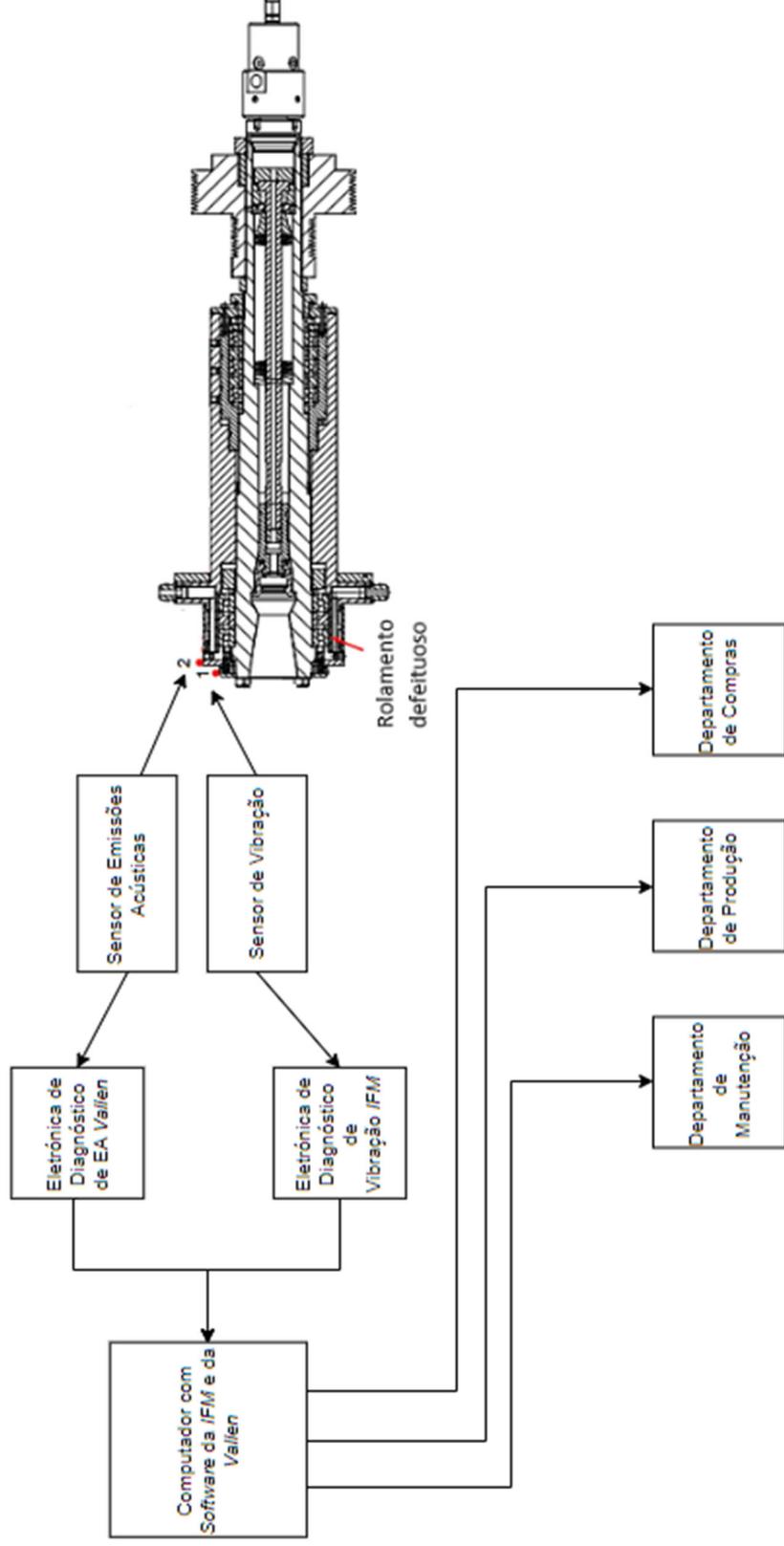
6.8 ANEXO 8

Ficha Técnica da Eletrónica de Diagnóstico da *IFM*.

6.9 ANEXO 9

Ficha Técnica do *software* de parametrização da *IFM*.

6.10 ANEXO 10



6.11 ANEXO 11

Ficha Técnica do sensor de Emissões Acústicas piezoelétrico da *Vallen*.

6.12 ANEXO 12

Ficha Técnica do processador de sinais da Vallen ASCO-DAQ2.

6.13 ANEXO 13

Manual de utilização dos hardwares e softwares da Vallen para um sistema de monitorização por EA.