



**ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MARÍTIMA**

Mestrado em Engenharia de Máquinas Marítimas

**Diagnóstico de falhas, utilizando a análise de vibração e a
termografia**

Duarte Maria d'Orey Manoel Lopo de Carvalho
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Máquinas Marítimas

Orientador: Prof. Doutor Luís Manuel Mendonça

E.N.I.D.H. Outubro, 2023



**ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MARÍTIMA**

Mestrado em Engenharia de Máquinas Marítimas

**Diagnóstico de falhas, utilizando a análise de vibração e a
termografia**

Duarte Maria d'Orey Manoel Lopo de Carvalho
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Máquinas Marítimas

Orientador: Prof. Doutor Luís Manuel Mendonça

E.N.I.D.H. Outubro, 2023

RESUMO

Esta dissertação pretende abordar a temática da manutenção condicionada, através da apresentação e posterior utilização de duas formas de diagnóstico de falhas em equipamentos: a medição de vibrações e a termografia.

A utilização da análise de vibrações permite estudar a evolução durante um determinado período os equipamentos existentes no IPAMEI. O uso da termografia em quadros elétricos, tubagens e painéis solares permite constatar a grande aplicabilidade desta técnica, tanto no diagnóstico de falhas, como na utilização da mesma no dia-a-dia.

Por manutenção entende-se o conjunto de ações que são levadas a cabo com vista a manter em condições aceitáveis de funcionamento os equipamentos e/ou instalações, de forma a aumentar a sua longevidade e a sua produtividade. Permite também controlar a sua qualidade e segurança com o mínimo de custos.

A manutenção condicionada é um tipo de manutenção preventiva, subordinada à informação de um sensor ou à medição de parâmetros pré-determinados teoricamente, que possibilitem identificar o estado de funcionamento e de degradação de um determinado equipamento. Este tipo de intervenção é realizado quando o equipamento exhibe componentes em mau estado e permite que a manutenção seja realizada o mais próximo possível da falha, sem, contudo, colocar em risco a segurança e o funcionamento do mesmo.

Palavras-chave: Análise de vibrações; Termografia; Diagnóstico, Manutenção; Manutenção condicionada; Equipamentos.

ABSTRACT

This dissertation aims to address the issue of conditioned maintenance, through the presentation and subsequent use of two forms of fault diagnosis in equipment: vibration measurement and thermography.

The use of these conditional preventive maintenance techniques allows the performance of certain interventions with lower costs, which can be executed before failure, maximizing the potential of the equipment.

Thus, the use of vibration measurement in IAPMEI equipment allowed to study their evolution over a given period and the use of thermography in IAPMEI and on Soflusa catamaran edge equipment allowed us to verify the great applicability of this technique, both in fault diagnosis and in check for fluids in the pipelines, because in case of system intervention it is possible to know which of the pipes is currently being used.

Maintenance means the set of actions that are taken to maintain equipment and / or facilities in acceptable working order, in order to increase their longevity and productivity, and control their quality and safety with minimum costs.

On the other hand, conditional maintenance is a type of preventive maintenance, subject to the information of a sensor or the measurement of predetermined parameters that make it possible to identify the operation and degradation state of a given equipment. This type of intervention is performed when the equipment has parts in bad conditions and allows maintenance to be performed as close as possible to the fault, without, however, jeopardizing its safety and operation.

Keywords: Vibration measurement; Thermography; Diagnosis; Maintenance; Conditioned maintenance, Equipment.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação assinala o fim de uma etapa importante da minha vida.

A cada passo do caminho tive o prazer, a honra e o privilégio de conhecer pessoas que tiveram uma influência considerável, tanto neste trabalho como na minha maneira de pensar. Este projeto não teria sido possível sem sua ajuda e incentivo.

Antes de mais gostaria de agradecer à minha mãe pelo seu exemplo e presença constantes que contribuíram tanto para o meu desenvolvimento profissional, como principalmente para a minha formação pessoal.

Muito devo também ao meu orientador, o Sr. Professor Luís Manuel Mendonça, pelo seu envolvimento, feedback, constante troca de ideias, críticas construtivas, entusiasmo e muita paciência. Agradeço também ao Sr. Professor Manuel Nogueira por ter criado a ponte entre mim e o IAPMEI foi essencial para esta dissertação. Os meus agradecimentos ao Sr. Eng.º Luís Alves Pereira responsável no IAPMEI pelo Departamento de Gestão do Património Imobiliário, onde estavam instalados os equipamentos que serviram de suporte ao presente estudo.

Um agradecimento muito especial à minha mulher e filha. Sem a vossa presença, constante incentivo e apoio, não teria sido possível concluir esta dissertação.

À Ana Manoel que fez a revisão deste trabalho, agradeço as muitas sugestões de melhoria, que ajudaram a tornar mais fácil a sua leitura.

Por último, mas não menos importante, estou muito grato à Escola Superior Náutica Infante D. Henrique, em especial ao departamento de Engenharia Marítima, por proporcionar aos seus alunos a possibilidade única em Portugal, de adquirir conhecimentos tão uteis para um país que deveria encarar o mar como um dos suportes fundamentais da economia no futuro.

ÍNDICE

RESUMO	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMENTOS	IV
INDICE DE TABELAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ABREVIATURAS UTILIZADAS	X
SÍMBOLOS UTILIZADOS	XI
EQUAÇÕES UTILIZADAS	XII
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos e Enquadramento.....	3
1.2. Estado de Arte	5
2. Manutenção	8
2.1. Manutenção Corretiva	12
2.2. Manutenção Preventiva	13
2.2.1. Manutenção Preventiva Sistemática	14
2.2.2. Manutenção Preventiva Condicionada	15
2.3. Custos agregados à Manutenção.....	17
3. Análise de vibrações.....	19
3.1 Conceitos teóricos.....	21
3.2 Vibrações em equipamentos industriais – Principais causas.....	26
3.3. Sistemas e Instrumentos para Medição de Vibração	33
3.3.1. Equipamento para medição da Vibração em Nível Global.....	34
3.3.2. Equipamento para medição de vibração com Análise da Frequência.....	34
4. Termografia.....	35
4.1 Evolução Histórica	36
4.2 Introdução Teórica.....	38
4.3. Aplicações da termografia	42
4.4 Procedimentos de medição e análise termográfica.....	46
5. Determinação de fatores de falhas – Desenvolvimento de método inteligente.....	47
5.1. Desequilíbrio	48
5.2. Desalinhamento	49
5.2.1. Desalinhamento Angular	50

5.2.2. Desalinhamento Offset.....	50
5.3 – Defeitos em engrenagens.....	51
5.4 – Defeitos/desgaste em pás.....	53
5.5 – Análise termográfica.....	54
6. Análise vibracional e termográfica	57
6.1 Grupo de bombagem – Medição e análise de vibrações	59
6.1.1 Grupo de bombagem.....	59
6.1.2 Análise dos resultados.....	62
6.2 Compressor - Medição e análise de vibrações.....	63
6.2.1 Grupo compressor.....	63
6.2.2 Análise dos resultados.....	64
6.3 Determinação de fatores de falhas.....	65
6.3.1. Desequilíbrio.....	65
6.3.2. Defeitos em engrenagens	67
7 - Conclusões	71
7.1 - Trabalhos Futuros.....	72
8 - Bibliografia	75

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exigências da Produção versus Respostas da Manutenção	10
Tabela 2 - Exemplo de algumas técnicas de manutenção preventiva e as suas aplicações.....	16
Tabela 3 - Comparação das técnicas mais utilizadas na detecção de avarias	20
Tabela 4- Comprimento de onda, frequência e energia que compõem a radiação do espectro eletromagnético.	40
Tabela 5 - Esquema utilizado na análise qualitativa e da análise quantitativa	47
Tabela 6 - Avaliação segundo a Norma ISO 2372.....	58
Tabela 7 - Comparativo valor global de RMS	59
Tabela 8 - Análise das frequências mais relevantes	62
Tabela 9 - Comparativo valor de overall - Compressor C1	63
Tabela 10 - Análise das frequências mais relevantes	64
Tabela 11 - Análise do FDQ	66
Tabela 12 - Análise da FTeng	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Importância da manutenção	2	
Figura 2 - Vista Aérea IAPMEI	4	
Figura 3 - Tipos de manutenção	12	
Figura 4 - Iceberg de custos	18	
Figura 5 - Sistema massa-mola	21	
Figura 6 - Movimento harmónico simples	22	
Figura 7 - Representação da amplitude	23	
Figura 8 - Vibração característica de cada componente da máquina	24	
Figura 9 - Domínio do tempo e da frequência	24	
Figura 10 - Sinal no domínio do tempo	25	
Figura 11 - Sinal no domínio da frequência	25	
Figura 12 - Exemplo de diagrama em cascata	26	
Figura 13 - Espectro tipo de equipamento com um desequilíbrio	27	
Figura 14 - Desalinhamento Angular	28	
Figura 15 - Desalinhamento offset	28	
Figura 16 - Espectro tipo de desalinhamento angular	28	
Figura 17 - Espectro tipo de equipamento com folgas de aperto num componente	29	
Figura 18 - Espectro tipo de equipamento com falhas nas engrenagens	30	
Figura 19 - Espectro tipo de equipamento equipado com alhetas ou ventoinhas	30	
Figura 20 - Espectro tipo de equipamento com defeito num rolamento - 1º estágio	31	
Figura 21 - Espectro tipo de equipamento com defeito num rolamento - 2º estágio	31	
Figura 22 - Espectro tipo de equipamento com defeito na correia de transmissão	32	
Figura 23 - Espectro tipo de equipamento com vibração excessiva devido a um vórtice	33	
Figura 24 - Gráfico de tendência	35	
Figura 25 - Sir William Herschel	37	
Figura 26 - Frequências do espectro eletromagnético.	39	
Figura 27 - Exemplos de uma câmara termográfica	40	
Figura 28 - Diagnóstico de doenças.	43	
Figura 29 - Energia térmica a radiar de um fusível.	43	
Figura 30 - Rolamento e chumaceira com uma possível falha.	43	
Figura 31 - Imagens termográficas a cinzentos, cores e fotografia natural.....	45	
Figura 32 – Representação esquemática de FFT de um defeito de desequilíbrio	48	
Figura 33 - Representação esquemática de FFT de um defeito de desalinhamento angular ...	50	
Figura 34 - Representação esquemática de FFT de um defeito de desalinhamento offset	51	
Figura 35 - Representação esquemática de FFT de um defeito nas engrenagens	51	
Figura 36 - Representação esquemática de FFT de um defeito/desgaste nas pás	53	
Figura 37 - Divisão da imagem em pixels	55	
Figura 38 - Conversão de valores de pixéis em valores da temperatura.	56	
Figura 39 - Esquema da instalação existente	58	
Figura 40 – Motor de acionamento da Bomba 2 e Bomba 1	59	
Figura 41 - 1º Medição – Horizontal	Figura 42 - Ponto 1 Pormenor	60
Figura 43 - 2º Medição – Horizontal	Figura 44 - Ponto 1 Pormenor	60
Figura 45 - 1º Medição – Horizontal	Figura 46 - Ponto 4 Pormenor	61
Figura 47 - 2º Medição – Horizontal	Figura 48 - Ponto 4 Pormenor	61
Figura 49 - Indicação do local onde houve medição de valores	63	
Figura 50 - Espectros ponto P1FH - existência de desequilíbrio 1ª Medição	65	
Figura 51 - Espectros ponto P1FH - existência de desequilíbrio 2ª Medição	65	

Figura 52 - Espectros ponto P1FH - existência de desequilíbrio 3ª Medição	66
Figura 53 - Espectros ponto P1FH - existência de desequilíbrio 4ª Medição	66
Figura 54 - Espectros ponto P1FH - existência de desequilíbrio 5ª Medição	66
Figura 55 - Espectro P3EH - existência de falha nas engrenagens 1ª Medição	67
Figura 56 - Espectro P3EH - existência de falha nas engrenagens 2ª Medição	68
Figura 57 - Espectro P3EH - existência de falha nas engrenagens 3ª Medição	68
Figura 58 - - Espectro P3EH - existência de falha nas engrenagens 4ª Medição.....	68
Figura 59 - Espectro P3EH - existência de falha nas engrenagens 5ª Medição	68
Figura 60 – Pormenor quadro elétrico.....	70
Figura 61 - Pormenor quadro elétrico	70
Figura 62 - Pormenor quadro elétrico	70
Figura 63 - Pormenor quadro elétrico	70
Figura 64 - Pormenor quadro elétrico	70
Figura 65 - Pormenor quadro elétrico	70
Figura 66 – Análise Termográfica	70
Figura 67 - Análise Termográfica	71
Figura 68 - Painel Solar.....	71
Figura 69 - Exemplo de drone de caparação de imagens termográficas	73

ABREVIATURAS UTILIZADAS

CCD	Charge Coupled Device
COTS	Based Wireless Magnetic Sensor for Small Satellites
CPM	Ciclos por Minutos
C_1	Valor do pixels
F_{DL}	Fator de desalinhamento
F_{QT}	Fator de desequilíbrio
FFT	Transformada de Fourier
FPA	Focal Plane Arrays
FLIR	Foward Looking Infra-Red (visão dianteira por infravermelhos).
IAPMEI	Instituto de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e à Inovação
NP	Nível de prioridade
OPA	Optical Phased Array
OWT	Offshore Wind Turbines
RMS	Root mean square/ Valor eficaz
RPM	Rotações por minuto
SHMS	Structural Health Monitoring System
TPM	Temperatura media dos pixels

SÍMBOLOS UTILIZADOS

A	Amplitude/ Área da superfície
α	Radiação absorvida
C	Constante que varia consoante o tipo de onda
C_I	Número de pixéis
c	Velocidade da luz no vácuo
E	Energia
ε	Emissividade
f	Frequência [Hz]
H	Constante de Planck
λ	Comprimento de onda
n	Rotação
ρ	Radiação refletida
Q	Potência
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
T	Período
T	Temperatura
τ	Radiação transmitida
x	Número de pás
z	Número de dentes da engrenagem

EQUAÇÕES UTILIZADAS

- 1) Determinação do valor de RMS
- 2) Determinação comprimento de onda
- 3) Determinação da frequência
- 4) Determinação da potência
- 5) Determinação da radiação absorvida
- 6) Determinação da emissividade
- 7) Conjugação da equação para determinação da emissividade com a Lei de Stefan-Boltzmann
- 8) Determinação do fator de desequilíbrio
- 9) Determinação do desalinhamento
- 10) Determinação do fator de desalinhamento
- 11) Determinação da frequência de engrenamento
- 12) Determinação da frequência de engrenamento da banda lateral esquerda
- 13) Determinação da frequência de engrenamento da banda lateral direita
- 14) Determinação do número de pás
- 15) Determinação da frequência de rotação das pás
- 16) Determinação do RMS das pás
- 17) Determinação da frequência de engrenamento
- 18) Velocidade de rotação do veio
- 19) Nível de prioridade
- 20) Variação da temperatura
- 21) Nível de prioridade
- 22) Níveis relativos à variação da temperatura
- 23) Valor médio de cada pixel
- 24) Temperatura intermedia
- 25) Declive da reta
- 26) Gradiente térmico
- 27) Seleção de um novo limite
- 28) Erro Quadrático Médio
- 29) Ruído de Pico

1. Introdução

A evolução tecnológica a que se assiste atualmente, é caracterizada por céleres e profundas mudanças em relação há 30 anos, havendo a clara necessidade de uma adaptação ao momento com o objetivo de se “criar mais com menos”.

A globalização dos mercados deu origem a uma concorrência, que é por vezes desequilibrada, havendo uma clara necessidade de maximizar todos os recursos existentes, sejam eles humanos, tecnológicos, ou outros, dando-se cada vez mais prioridade ao impacto ecológico, com vista a melhorar a qualidade de vida de todos os envolvidos neste processo. Associada a esta realidade, a manutenção e a sua integração nas empresas tem um papel fulcral como forma de redução de custos.

Por outro lado, todos os equipamentos/sistemas sofrem desgaste, decorrente da sua normal utilização e como tal, torna-se necessário recorrer a técnicas de manutenção, as quais têm como objetivo manter o equipamento em funcionamento, com um baixo índice de indisponibilidade. É também importante promover uma redução de custo, seja pela substituição atempada do equipamento, ou pela substituição/reparação dos constituintes com desgaste imediatamente, antes do seu fim de vida útil.

A importância da manutenção, conforme indicado na Figura 1 está relacionada com a escassez de matérias-primas, a necessidade de preservação do ambiente, as exigências de qualidade, o desenvolvimento/automação dos equipamentos, a segurança na sua utilização e desgaste dos mesmos. O investimento atual e o aumento dos custos da manutenção, entre outros fatores, comprovam a enorme importância que a manutenção tem para as empresas.

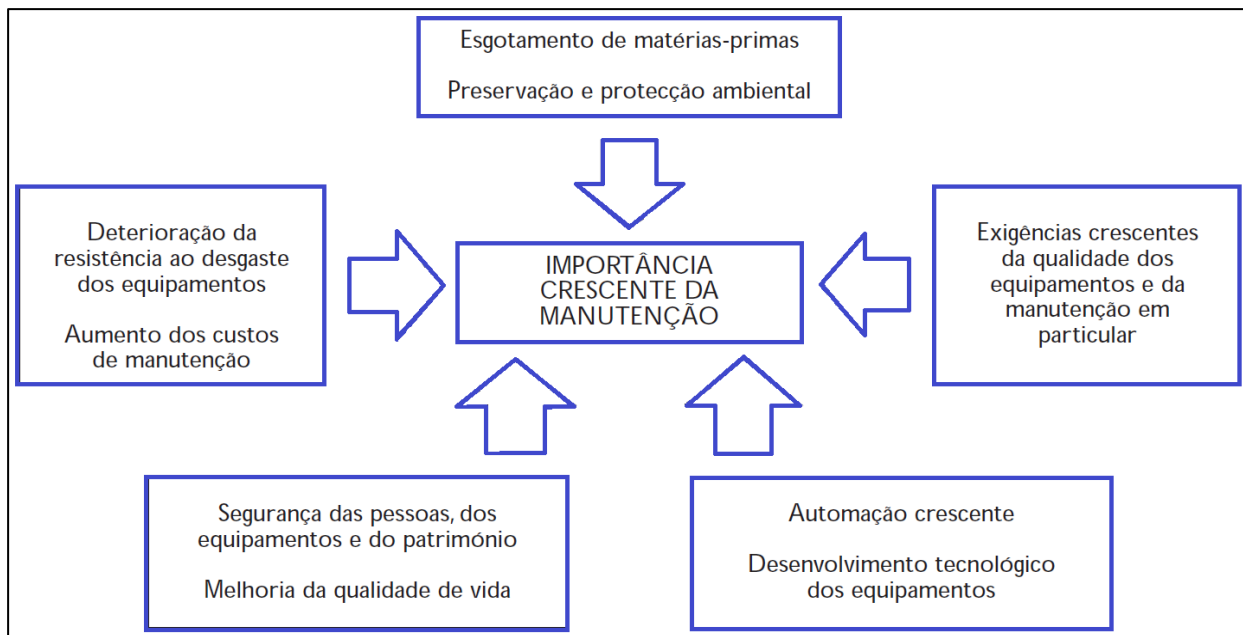


Figura 1 - Importância da manutenção [1]

A forma como é realizada a manutenção dos equipamentos tem um impacto significativo na produção e na qualidade dos produtos, refletindo-se nos custos globais das empresas, nomeadamente nos custos de não-qualidade/improdutividade.

Assim, de forma a compensar os custos extras com a utilização de uma manutenção condicionada e com a implementação de técnicas de monitorização de condição, a equipa de manutenção deve ter uma formação adequada, que deve ser atualizada regularmente, para que tenha acesso as filosofias de manutenção mais atuais.

Caso pretenda justificar vantagens deste tipo de manutenção, a equipa pode apresentar valores para os custos da não realização da manutenção. [2]

Com a realização desta dissertação pretendem-se apresentar as técnicas de medição/análise de vibrações e a termografia, assim como utilização que estas duas formas de diagnóstico de falhas podem ter na manutenção condicionada de equipamentos, bem como na vida útil de uma instalação.

1.1. Objetivos e Enquadramento

Atualmente, as empresas estão mais focadas nas questões relacionadas com a manutenção dos equipamentos. A essa crescente preocupação não é alheio o facto de que o ambiente altamente competitivo que se vive nos mercados, gera a necessidade de diminuir os custos e rentabilizar a produção.

Cientes de que o aumento da produtividade está intrinsecamente relacionado com o bom funcionamento e a fiabilidade dos equipamentos, as empresas começaram a sentir a necessidade de implementar planos de manutenção preventiva condicionada, com vista a programar todas as intervenções e inspeções.

Neste contexto, importa estar atento às mais recentes técnicas de manutenção, dada a contínua evolução tecnológica que se tem feito sentir nesta área, com novas metodologias, direcionadas para a diminuição de custos e o aumento de rendimento dos equipamentos.

Entre as técnicas mais recentes, encontram-se a termografia e a medição de vibrações, metodologias a ser abordadas nesta dissertação.

As vibrações, presentes em qualquer tipo de mecanismo com elementos rotativos, originam frequentemente problemas, nomeadamente ao nível dos elementos em movimento, deteriorando gradualmente os equipamentos e reduzindo a longevidade dos mesmos.

Neste sentido, esta dissertação tem como objetivo principal pesquisar as técnicas avançadas de análise e medição de vibrações e a sua aplicação no âmbito da manutenção preventiva condicionada. Pretende-se de igual modo estudar a aplicação da termografia no mesmo âmbito, cientes de que grande parte dos problemas e avarias ocorridos nos equipamentos industriais, são precedidos de alterações de temperatura, que podem ser detetadas através de um sistema específico. Pensamos que com a implementação de programas regulares de inspeção a instalações, equipamentos, quadros elétricos, entre outras, que incluam estas duas técnicas, será possível minimizar o risco de falhas dos equipamentos e as suas consequências.

Assim, pretende-se estudar a aplicação prática destas duas técnicas de manutenção preventiva condicionada, de modo a verificar a sua viabilidade, o nível de complexidade de aplicação e de interpretação. Propomo-nos ainda desmistificar a ideia da complexidade da manutenção

condicionada e comprovar que esta constitui uma ferramenta para o controlo de qualidade das reparações efetuadas.

Para o estudo foi selecionado inicialmente um motor gerador existente em toda a frota Soflusa, uma vez que deixei de estar na empresa que fazia a gestão técnica da frota, houve necessidade de alterar o objeto de estudo e houve a possibilidade de ser feito nos equipamentos de refrigeração/aquecimento do ar existentes no edifício principal do IAPMEI, identificado na Figura 2.

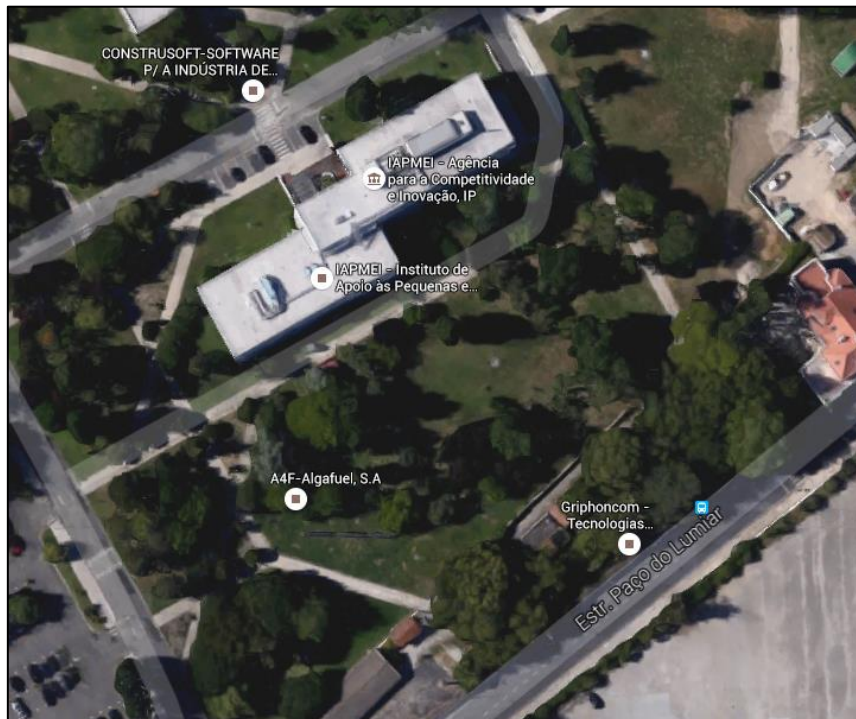


Figura 2 - Vista Aérea IAPMEI

A abordagem metodológica adotada para a elaboração desta dissertação, compreende uma parte teórica, em que se faz uma pesquisa de literatura tendo em vista a identificação e desenvolvimento dos conceitos analíticos associados às palavras-chave que formulam o tema: manutenção, manutenção condicionada, termografia, medição de vibrações. Pretende-se assim construir uma base de conhecimentos que possibilite enquadrar teórica e conceptualmente este estudo. A parte prática, compreende a aplicação das técnicas objeto deste estudo, que se pretende que possam servir de complemento à teoria. Espera-se que os resultados comprovem a sua utilidade na identificação dos problemas, característicos dos equipamentos que irão ser examinados.

1.2. Estado de Arte

A análise de vibrações constitui uma importante ferramenta aplicada à manutenção condicionada, através desta técnica é possível detetar as falhas numa fase inicial, conhecer as suas origens e calcular o seu tempo de vida aproximado, através da chamada curva de tendência, um histórico que vai sendo criado ao longo de vários anos. Para tal, são realizados o levantamento e o posterior acompanhamento das avarias, referentes aos componentes mecânicos, com recurso ao registo de vibrações e da fotografia do componente substituído, que permitem a criação desse histórico.

No artigo [3] a autora demonstra a importância da análise de vibrações para uma melhoria da manutenção em aerogeradores, convicta de que esta ferramenta permite um planeamento mais adequado para a implementação de manutenção preventiva condicionada, reduzindo tempos de paragem inesperada e as perdas de produção de energia. O artigo tem como objeto de estudo os aerogeradores dos parques eólicos de Freita e da Lousã. Segundo a autora esta investigação foi motivada pela queda de alguns aerogeradores e a falha precoce das suas caixas multiplicadoras. Este tipo de avarias resulta geralmente em longas paragens que geram avultados custos, não só devido à falta de produção, mas também porque os aerogeradores constituem o elemento mais dispendioso do parque. A utilização da análise de vibrações, permite realizar o diagnóstico de avarias mecânicas e estruturais, através do conhecimento das frequências de cada componente e da própria estrutura do equipamento. Assim, é possível controlar a evolução dessas mesmas frequências, evitando falhas prematuras nos componentes mecânicos e estrutura, com o recurso a essa informação como referência para planear futuros trabalhos de manutenção.

Com este estudo foi possível identificar as principais fontes de vibrações transmitidas ao sistema e à sua estrutura, de forma a compreender o seu comportamento face à fadiga dos componentes mecânicos dos geradores eólicos. Isto permitiu planear a manutenção num formato mais eficiente, uma vez que a análise de vibrações possibilitou conhecer o estado de condição do aerogerador, tendo sido um dos indicadores mais precisos na identificação da fonte perturbadora, pelo que conclui ser esta técnica extremamente fiável e bastante precisa na deteção de avarias.

No seu trabalho a autora faz também referência a um novo modelo de monitorização, que inclui a termografia, que aliada à análise de vibrações e em conjunto com a endoscopia e análises de óleos, permitem obter melhorias significativas em termos de manutenção dos aerogeradores.

Faz, no entanto, uma ressalva, referindo o custo elevado destas técnicas, que constitui uma desvantagem para a sua aplicação prática. Salienta ainda que para se efetuar o diagnóstico através da análise de vibrações, não só é necessário utilizar equipamento adequado, como requer o conhecimento de uma extensa bibliografia e possuir uma vasta experiência na área.

A utilização da análise de vibrações para fazer a monitorização de aerogeradores foi também investigada por vários autores entre eles [4] [5] [6]. No entanto uma grande parte da literatura centra-se na sua utilização para monitorizar as infraestruturas de pontes e os seus sistemas de gestão [7] [8] [9] [10] [11] [12], entre outras.

Apesar do reconhecimento que tem sido dado a esta técnica e às suas vantagens, a análise de vibrações é uma técnica que tem tardado a implementar-se em muitas organizações, pois requer da parte dos especialistas, o domínio de um grande número de técnicas e conceitos sofisticados e o tratamento de um grande volume de dados, obtidos através da recolha de informação. Isto implica muitas vezes a necessidade de ter várias pessoas adstritas à tarefa de analisar esses dados, o que se traduz em custos muito elevados.

Neste sentido, a literatura tem apresentado diversas abordagens destinadas a facilitar a interpretação e processamento dos dados, que integram *softwares* dedicados em sistemas que se convencionou apelidar de “sistemas inteligentes”. Estes sistemas incluem uma vasta gama de técnicas, quer no âmbito da automação e controlo, quer no âmbito da inteligência artificial, nomeadamente nas redes neuronais; lógica difusa e “*wavelets*”. Entre os trabalhos apresentados inclui-se uma técnica que permite identificar precocemente falhas em engrenagens, através da comparação de espectros no domínio do tempo, usando o teste de *Kolmogorov-Smirnov* [13], modelos preditivos do estado de condição [14] [15], sistemas inteligentes a incorporar em software que recorre ao conhecimento acumulado em bases de dados de falhas para estabelecer regras de decisão [16] sistemas micro eletromecânicos inteligentes incorporados nos equipamentos que monitorizam e avaliam continuamente o estado de condição [17] e o trabalho levado a cabo na Escola Naval do Alfeite, onde foram utilizados sensores COTS de baixo custo, para detetar e identificar avarias, com resultados bastante satisfatórios. [18]

Devido ao notável desenvolvimento que ocorreu na Europa, na última década, a energia eólica tornou-se a fonte de energia renovável mais rentável, motivo pelo qual se têm multiplicado os estudos direcionados para a pesquisa das técnicas que possam contribuir para o desenvolvimento de estratégias de manutenção, baseadas em condições eficientes e para o

aperfeiçoamento dos Sistemas de Monitorização de Saúde Estrutural, vocacionados para as turbinas eólicas *offshore* (OWT) [19] [20] [21] [22]. Na base desta investigação, está a convicção de que a otimização dessas estratégias, ajudará a reduzir os custos de mão-de-obra com as inspeções e a evitar manutenções desnecessárias. Na medida em que a identificação dos pontos fracos do projeto antes da falha, melhoram a disponibilidade de produção de energia e, ao mesmo tempo, impedem a sobrecarga das turbinas e maximizam o retorno dos investimentos.

Num destes estudos [22], foi realizada uma revisão dessas técnicas. Foi dada ênfase especial à termografia, nomeadamente a um tipo particular de metodologia de imagem térmica ativa, denominada método de *stress* termo elástico, baseado no efeito termo elástico. Este método consiste na mudança da temperatura do sólido inelástico, produzido por uma mudança de stress [23]. Na região danificada ou anormal [24], ocorrem diferentes conduções de calor, um maior amortecimento acústico e concentração de tensão. Esta técnica provou ser útil nos testes de fadiga das lâminas das turbinas eólicas como comprovam [25] [26]. Podem ser observadas as concentrações de stress durante o teste, antes que os danos na superfície se manifestem. A promoção da variação desta metodologia envolve a aplicação de ultrassons de alta potência, como refer [27], ou oscilação de tensões com um *shaker* mecânico, na superfície que está sendo testada [24]. Essa técnica é chamada de vibro-termográfica e é capaz de localizar e avaliar as dimensões da fenda, como afirma [27]. Além disso, pode ser usado para vazios e concentração de tensão em compósitos. No entanto, este método tem o potencial de se tornar uma técnica promissora de *Structural Health Monitoring System* [SHMS] para as turbinas eólicas *offshore*, apesar de ser necessária a realização de mais pesquisas, para reduzir a sensibilidade às variações de temperatura [25].

No entanto, a utilização da termografia na manutenção preventiva condicionada, não se limita aos aerogeradores, o que é comprovado por vários estudos onde se investiga a sua utilização em sistemas elétricos [28], em unidades de distribuição [29], na deteção de falhas em equipamentos elétricos de subestações [30], nas inspeções de transmissões elétricas e linhas de distribuição [31], no diagnóstico de fiabilidade de equipamentos elétricos [32] [33] e inclusive no ambiente utilitário rural [34].

2. Manutenção

A palavra manutenção vem do latim *manus tenere*, que significa manter o que se tem. Esta ideia está presente desde as sociedades pré-históricas, embora o termo só tenha aparecido em meados do século XVI, na Europa Central, aquando do surgimento do relógio mecânico, devido ao aparecimento dos primeiros técnicos de montagem e assistência. [35]

Existem diversas definições técnicas para o termo manutenção, das quais destaco:

a) “A combinação de ações de gestão, técnicas e económicas, aplicadas aos bens para otimização do seu ciclo de vida”. [36] ;

b) “O conjunto de ações destinadas a assegurar o bom funcionamento das máquinas e das instalações, garantindo que elas são intervencionadas na altura devida, por forma a evitar que avariem ou baixem de rendimento e, no caso de tal acontecer, que sejam repostas em boas condições de operacionalidade com a maior brevidade, tudo a um custo global otimizado”. [37]

Inicialmente, na atividade industrial considerava-se a manutenção uma atividade secundária intrínseca à utilização dos equipamentos, cujo principal objetivo era manter os equipamentos operacionais e só em caso de avaria é que se procedia à sua reparação.

Este período inicial da manutenção, que surgiu por volta de 1940, é referido em diversa literatura como: “Fase 1 da Evolução da Manutenção – Reparar a Avaria”: quando se adquiria o equipamento, o utilizador recebia formação para ser o próprio a realizar a reparação.

Após a Segunda Guerra Mundial, a evolução da aviação comercial fez surgir a necessidade de alterar a manutenção dos equipamentos, com o objetivo de os manter operacionais, com o menor tempo de imobilização possível.

Esta fase da manutenção denomina-se: “Fase 2 da Evolução da Manutenção – Evitar a Avaria”. Foi nesta altura que começaram a ser desenvolvidos modelos matemáticos de previsão de falhas, assim como a análise estatística e controlo de fiabilidade e começaram-se a utilizar sistemas computacionais dirigidos para a manutenção, só possíveis com a difusão dos computadores a partir da década de 60. É também nesta fase que se começaram a aplicar técnicas de planeamento, anteriormente quase exclusivas da indústria militar e a criar processos

científicos para a manutenção, nomeadamente no que diz respeito ao comportamento dos materiais.

O crescente peso da globalização dos sistemas computacionais, ditou o início da fase atual da manutenção: “Fase 3 da Evolução da Manutenção - Antever a Avaria “. Os avanços tecnológicos então verificados, nomeadamente na microeletrónica, permitiram uma maior oferta de sistemas de medição, a que acresce um aumento da sua precisão, com a utilização de instrumentação digital. A utilização destas ferramentas tem como principal objetivo evitar a ocorrência de avarias, através do diagnóstico precoce, maximizando o sistema, ou seja, os componentes são substituídos o mais próximo possível do seu fim de vida útil, com custos de utilização mais reduzidos [38].

Para além dos autores citados, outros classificam a evolução da manutenção por gerações de desenvolvimento, sendo que a 1ª Geração se situa entre 1940-1950 (reparar após avaria), a 2ª Geração entre as décadas de 60 e 70 do século XX (evitar a avaria) e a 3ª Geração (antever a avaria) processou-se a partir de 1980 [39].

A evolução da manutenção responde às exigências da produção, como se pode verificar nas tabelas seguintes. Assim a Tabela 1, ilustra as exigências da produção e a resposta às exigências da manutenção.

	1ª Fase	2ª Fase	3ª Fase
	1940-1950	1960-1970	Desde 1980
Exigências da Produção	<ul style="list-style-type: none"> • Reparar quando partir 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada Responsabilidade • Longa vida dos equipamentos • Baixos custos 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada disponibilidade • Elevada fiabilidade • Elevado grau de segurança • Melhor qualidade do produto • Sem influencia do meio ambiente • Longa vida dos equipamentos • Eficiência do investimento
Respostas da Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Reparar quando partir 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisões programadas • Sistemas de planeamento e controlo dos trabalhos • Análise computacional demorada e onerosa 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorização de condições • Design para a fiabilidade e manutibilidade • Estudo de riscos • Análise computacional simples e de baixo custo • Análise dos modos e efeitos de falhas • Sistemas inteligentes • Equipas de trabalho polivalentes

Tabela 1- Exigências da Produção versus Respostas da Manutenção [39]

Todos os tipos de manutenção têm vantagens e desvantagens, mas o conhecimento do comportamento dos equipamentos/sistemas e o tempo de vida útil estimado, seja através de equipamentos/sistemas semelhantes ou da experiência e conhecimento, permite uma análise mais fiável, possibilitando uma maior rentabilidade e menor indisponibilidade dos mesmos.

Para além da sua vertente especificamente técnica, a manutenção abrange, hoje em dia, um conjunto muito vasto de atividades destinadas a responder a exigências legais, certificação, segurança e sustentabilidade social. Esta última entendida como a capacidade de as organizações exibirem e poderem demonstrar, que conduzem as suas atividades utilizando práticas seguras, respeitadoras do ambiente e socialmente aceites.

Pelas razões acima descritas, e atendendo ao perfil tecnológico dos equipamentos e instalações atuais, a função da manutenção assume-se como uma atividade de primeira linha, com exigências de desempenho multidisciplinares.

Neste sentido é fundamental definir o tipo de manutenção a executar aos equipamentos, tendo em vista diversos objetivos, tais como:

- Menor custo,
- Maior rentabilidade,
- Uso do sistema até a inoperacionalidade e posterior substituição,
- Substituição dos constituintes com desgaste, em intervalos de tempo programados,
- Substituição dos componentes através de uma análise dos seus constituintes, até próximo do fim de vida útil.

A manutenção pode ser dividida em dois tipos principais: a manutenção não planeada, ou de emergência, e a manutenção planeada (Figura 3).

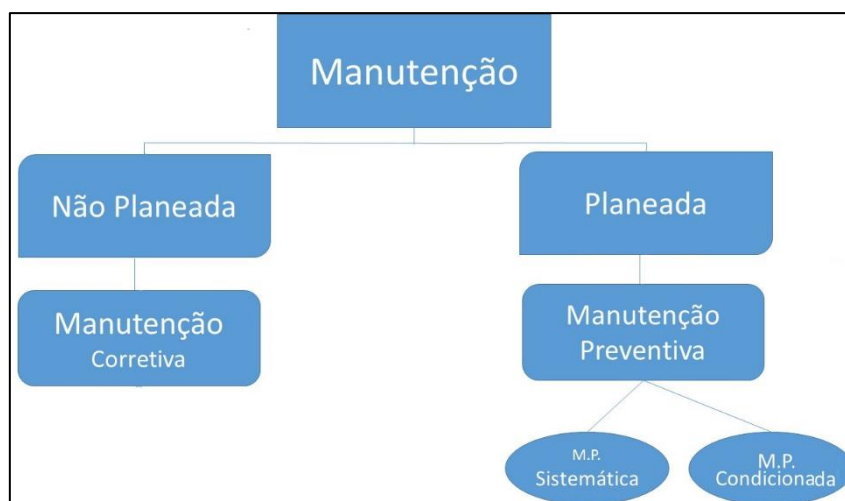


Figura 3 - Tipos de manutenção [40]

A manutenção não planeada/corretiva é característica dos anos 40, em que apenas se fazia manutenção quando existia uma avaria, daí ser também denominada de manutenção de emergência. Atualmente, este tipo de manutenção só se aplica em componentes que não ponham em causa o funcionamento da instalação e/ou em equipamentos com diversas redundâncias.

A manutenção planeada/preventiva, pode ser classificada em dois tipos distintos: a manutenção sistemática e a manutenção condicionada.

2.1. Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva tem como objetivo reparar os equipamentos e colocá-los em estado de bom funcionamento. Consiste na análise do estado geral dos equipamentos, no estudo das avarias repetitivas e nos pontos críticos. Este tipo de manutenção agrupa as avarias por causa e elabora a sequência de operações para cada tipo de intervenção [41].

Este tipo de intervenção pode ter como finalidade reparar definitivamente a avaria ou ser uma manutenção designada de paliativa em que a intervenção se destina a reparar provisoriamente uma avaria, para que o equipamento possa continuar em funcionamento. A resolução definitiva é adiada para quando houver condições de a mesma ser efetuada [38].

A manutenção corretiva justifica-se quando os custos indiretos da avaria são mínimos, não existem problemas de segurança e o número de máquinas existente permite que eventuais avarias não afetem de forma crítica a produção ou o serviço [38].

2.2. Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é efetuada antes da ocorrência de avarias. Trata-se de uma manutenção que é programada para ser efetuada em intervalos de tempo predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos para o equipamento, com o objetivo de reduzir a probabilidade de avaria ou degradação do seu funcionamento [41]. Este tipo de manutenção pode ser efetuada sem colocar em causa o funcionamento do sistema e permite reduzir o risco de acidentes graves devido a avarias, com o conseqüente aumento da segurança pessoal e dos sistemas. Contribui também para a redução dos níveis de *stocks* de segurança e facilita a redução das redundâncias dos sistemas. Por fim reduz o consumo de energia nas operações de manutenção. [42]

A manutenção preventiva é atualmente o tipo de manutenção recomendado para o bom funcionamento das instalações e equipamentos. Apresenta grandes vantagens em relação a modelos assentes na manutenção corretiva e na manutenção não planeada. Destas destacam-se as seguintes vantagens enunciadas em [38]:

- ⇒ Aumento da fiabilidade de um equipamento, através da redução das avarias em serviço;
- ⇒ Redução de custos motivados por avarias e aumento da disponibilidade do equipamento;
- ⇒ Aumento da longevidade eficaz de um equipamento;
- ⇒ Mais segurança nas intervenções, pois existe menos imprevisto;
- ⇒ Melhor planeamento dos trabalhos;
- ⇒ Redução e regularização da carga de trabalho;
- ⇒ Maior facilidade em gerir stocks uma vez que existe previsão de consumos.

Existem duas formas de manutenção preventiva:

- Sistemática;
- Condicionada.

2.2.1. Manutenção Preventiva Sistemática

A manutenção preventiva sistemática é efetuada em intervalos de tempo preestabelecidos, ou segundo um número definido de unidades de utilização, sem que haja controlo prévio do estado do equipamento [41]. Os intervalos de tempo entre intervenções baseiam-se geralmente nas informações dos fabricantes, os quais comunicam a expectativa mínima do tempo de vida dos componentes, no entanto a opinião do técnico pode ser fundamental para ajustar os intervalos pré-determinados com base na experiência de utilização. Este pode elaborar um estudo de fiabilidade a partir do histórico do equipamento e do panorama real em que o equipamento opera, conforme indicado em [43].

Este tipo de manutenção é normalmente utilizado nas operações de lubrificação, nas verificações periódicas obrigatórias e na substituição de componentes com custo reduzido.

As suas principais vantagens são [44]:

- O custo de cada operação de manutenção é predeterminado;
- A gestão financeira é simplificada;
- As operações e paragens são programadas de acordo com a produção.

As suas maiores desvantagens são [44]:

- O custo de cada operação é elevado devido à periodicidade, uma vez que os componentes substituídos ainda podem estar dentro do seu normal funcionamento;
- Existe maior possibilidade de erro humano, dada a frequência de intervenções;
- O custo de mão-de-obra é elevado, pois, de um modo geral estas intervenções são realizadas quando os equipamentos não estão a produzir, em horário em que o custo da mão de obra é mais elevado;
- A desmontagem, ainda que superficial, incita à substituição de peças provocada pelo síndrome de precaução;
- A multiplicidade de operações aumenta o risco de introdução de novas avarias.

Outros autores referem ainda a existência de alguns inconvenientes, quando este tipo de manutenção é utilizado em componentes sujeitos a desgaste. Tal deve-se ao facto da possibilidade de que o padrão de desgaste de determinado componente não seja constante ao longo do tempo. Corre-se o risco de se substituir um componente ainda com muito tempo de vida útil, ou pelo contrário, este avariar antes do tempo previsto [45]

Outra desvantagem, motivada por essas intervenções desnecessárias, é a introdução de defeitos não existentes anteriormente no equipamento. Segundo [46] estes podem ocorrer devido a:

- Falha humana;
- Falha de sobressalentes;
- Contaminações introduzidas no óleo;
- Danos durante a paragem e arranque do equipamento;
- Falha nos procedimentos de manutenção.

A manutenção preventiva sistemática pode ser aplicada a diversos tipos de equipamentos, nomeadamente em [47]:

- Equipamentos com custos de avaria elevados;
- Equipamentos que acarretam a paragem de todo o equipamento global;
- Equipamentos cuja paragem vai ser de longa duração;
- Equipamentos que colocam em causa a segurança do pessoal ou dos utilizadores;
- Equipamentos sujeitos a legislação particular.

2.2.2. Manutenção Preventiva Condicionada

A manutenção preventiva condicionada diferencia-se dos outros tipos anteriormente mencionados, por ser uma manutenção que avalia e monitoriza o estado do equipamento. Trata-se de uma abordagem baseada na vigilância do funcionamento do equipamento e subordinada à medição de parâmetros pré-determinados, que irão revelar o estado de funcionamento e de degradação de um determinado equipamento, através da sua comparação com os valores padrão de funcionamento. A vigilância do funcionamento e dos parâmetros pode ser efetuada seguindo uma calendarização, a pedido ou de forma contínua [41]. Este controlo permite que a avaria seja detetada atempadamente, pelo que a programação da respetiva intervenção de manutenção pode ser feita com a antecedência. Isto permite também reduzir os custos de manutenção e os custos de indisponibilidade, uma vez que a aquisição de peças será feita consoante a

necessidade, reduzindo o stock necessário. A programação das intervenções permite evitar paragens desnecessárias na linha de produção [45].

Existem várias técnicas que podem ser aplicadas na manutenção preventiva onde se incluem: a análise de óleo, ultrassons, a termografia e análise de vibrações as quais abordaremos brevemente em seguida.

A Tabela 2, ilustra algumas dessas técnicas e a sua aplicação a determinados equipamentos. Destacamos, as duas técnicas que são objeto desta dissertação. É possível verificar que ambas têm uma multiplicidade de aplicações, em especial no caso da termografia, que cobre toda a gama de aplicações abaixo indicadas.

Técnicas de manutenção	Equipamentos				
	Bombas	Motores	Geradores	Disjuntores	Permutadores de calor
Análise de vibrações	X	X	X		
Análise de partículas/lubrificação	X	X	X		
Análise por ultrassons	X	X	X		X
Termografia infravermelha	X	X	X	X	X
Inspeção visual	X	X	X	X	X

Tabela 2 - Exemplo de algumas técnicas de manutenção preventiva e as suas aplicações [48]

Análise de óleos

A análise de óleos é uma técnica que permite estudar o atrito, o desgaste e a lubrificação de superfícies sólidas, que se encontrem em contacto, através da análise das condições lubrificantes do óleo e das partículas de desgaste presentes no mesmo.

No que concerne à primeira, procede-se à recolha de uma amostra de óleo para analisar as suas qualidades e verificar se as propriedades físico-químicas desejadas para o efeito estão presentes. Esta análise deve ser efetuada de forma periódica e os parâmetros testados durante a realização da mesma, estes devem ser os seguintes:

- Viscosidade;
- Contaminação (que pode ser, por exemplo, a presença de água);

- Teor de sólidos;
- Oxidação;
- Ponto de inflamação. [49]

A análise de partículas de desgaste destina-se a investigar o estado do equipamento. Para tal é retirada uma amostra de óleo para analisar a quantidade, a composição e o tamanho das partículas presentes, o que permite avaliar a condição do equipamento.

A análise das partículas de desgaste pode ser feita com recurso a dois métodos: a espectrometria e a ferrografia. A espectrometria utiliza filtros graduados para separar os sólidos e está limitada a partículas de 10 µm ou menos. A ferrografia, por seu turno, permite separar as partículas com recurso a um campo magnético, pelo que se encontra limitada a partículas ferrosas ou magnéticas, com uma dimensão ≤ 100 µm. Esta técnica constitui uma excelente ferramenta para a deteção de falhas, apresentando a desvantagem de ter um custo elevado e obrigar a uma análise rigorosa dos resultados obtidos [50].

Ultrassons

Os ultrassons constituem uma técnica que, à semelhança da análise de vibrações, permite monitorizar o estado do equipamento ou sistema. Esta técnica diferencia-se da análise de vibrações, porque serve para detetar o ruído propagado nos meios gasosos, enquanto que primeira monitoriza o estado do equipamento através da vibração propagada no meio sólido.

Outra das diferenças entre as duas técnicas consiste nas frequências em que operam, dado que os ultrassons funcionam em frequências de ruído muito elevadas, ou seja, numa gama de valores acima de 20.000 Hz. Esta técnica é útil em determinadas situações, como é o caso de deteção de fugas que geram, geralmente, ruído de elevada frequência [50].

A análise de vibrações e termografia, por serem o objeto principal desta dissertação serão abordadas detalhadamente nos capítulos 3 e 4.

2.3. Custos agregados à Manutenção

Nenhum estudo de implementação de programas de manutenção se pode considerar concluído, se não tiver em linha de conta os custos envolvidos. Estes são fatores muito importantes e condicionantes da escolha do tipo de manutenção a realizar. [51]

Os custos diretos abarcam:

- Tempo gasto pelos executantes;
- Valor de materiais substituídos, incluído custo de transporte e manuseamento;
- Caso haja subcontratação do serviço, o valor associado e todos os gastos inerentes desde a execução do caderno de encargos até aceitação do trabalho;
- Custos globais da manutenção, nomeadamente custos fixos (apoio administrativo, eletricidade, telefone, entre outros);
- Custos de materiais em *stock* e ferramentas.

Os custos indiretos, aos quais estão agregados a perdas de produção [52]:

- Perdas de produção por irregular/não-conformidades;
- Custos de inatividade, se o equipamento ou instalação estão parados, não existe a produção;
- Custos de inoperacionalidade, uma vez que os equipamentos adquiridos têm um custo e ao estarem parados vão ter despesas de amortização;
- Custos por não cumprimento dos prazos (perda de fornecedores, penalidades previstas em contrato).

A Figura 4, ilustra o chamado *iceberg de custos*, o qual representa os custos reais de manutenção, sendo que a zona submersa (4 vezes superior) representa alguns custos difíceis de quantificar (custos indiretos), enquanto que os custos contabilísticos (custos diretos), se encontram na ponta visível. Estes são os que normalmente são tidos em conta tal como indicado em [37].

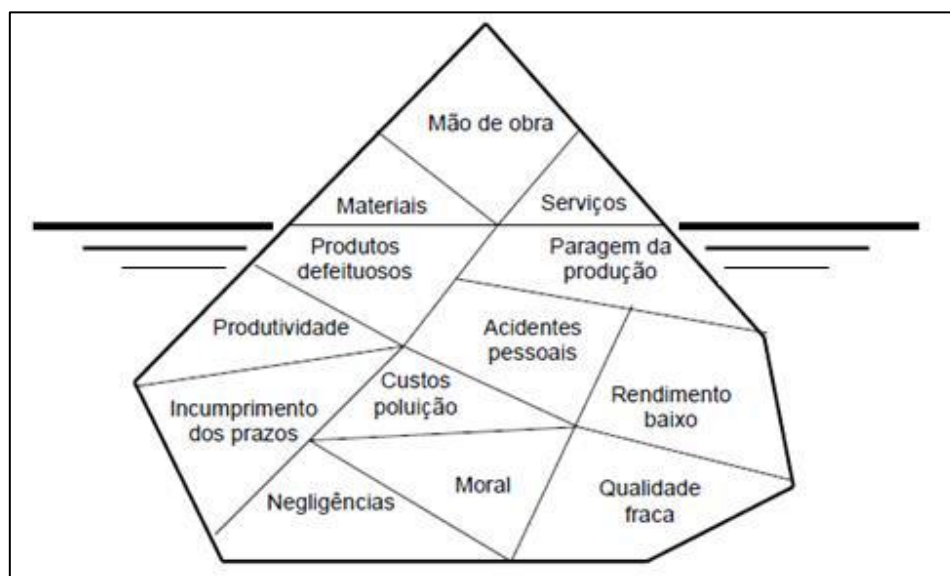


Figura 4 - Iceberg de custos [53]

3. Análise de vibrações

Tal como referido no capítulo anterior, a manutenção preventiva condicionada é um tipo de manutenção que se baseia na monitorização da condição de funcionamento dos equipamentos. Para tal recorre a várias técnicas, que permitem monitorizar o estado de degradação dos mesmos.

A análise de vibrações é uma dessas técnicas, sendo uma das mais utilizadas, permite detetar e identificar precocemente vários problemas, tais como: desalinhamentos, desequilíbrios, anomalias em rolamentos, existências de folgas, entre outras. A deteção das avarias faz-se através da medição do nível de vibrações do equipamento. Deve ser realizada periodicamente e a medição é feita em vários pontos-chave do equipamento, sem interromper o seu funcionamento, com recurso a equipamentos de leitura específicos. As leituras obtidas serão depois comparadas com os valores de referência constantes do manual do fabricante, ou através do seu histórico de valores já validados, assim é possível indicar a existência de uma anomalia no equipamento.

Diversos autores tais como [54] [55] [56], destacam as vantagens desta técnica em comparação com outras metodologias, como as análises de lubrificantes e de partículas de desgaste, mencionadas na seção dedicada à análise de óleos, a inspeção visual, a análise de ultrassons, e a termografia. Esta vantagem deve-se à grande diversidade de análise dos equipamentos, órgãos e componentes a controlar e a analisar. Das vantagens apontadas sublinha-se a sua versatilidade, o facto de não ser intrusiva e permitir identificar os defeitos numa fase embrionária, possibilitando a intervenção no equipamento de forma planeada, antes que ocorra uma avaria grave. Além disso, a recolha regular de dados de vibração permite também a identificação de tendências nos valores da vibração, que de acordo com a sua evolução ao longo do tempo, ajudam a prever o momento em que se atingem valores pré-determinados e assim planear atempadamente as intervenções.

Segundo [56], outra das justificações avançadas para esta preferência, relaciona-se com o facto de que esta técnica é a que melhor se adequa tanto aos equipamentos rotativos como nos alternativos. Permite também identificar um elevado número de anomalias, sem afetar a disponibilidade das máquinas. Para tal existe metodologia estatística diversa, que pode ser utilizada para a análise de vibrações e que procura identificar os principais problemas associados à sua implementação

A Tabela 3 da autoria de [56], apresenta uma análise comparativa entre esta técnica e outros métodos de diagnóstico e monitorização de condição. Demonstra a sua adequabilidade na deteção de uma vasta gama de avarias.

Defeito / Técnica	Análise de vibrações	Termografia	Análise de óleos	Análise acústica	Visualização com estroboscópio
Desequilíbrio	√	•	•	•	•
Desalinhamento	√	◇	•	•	•
Empeno de veio	√	•	•	•	•
Desaperto	√	•	•	•	◇
Ressonância	√	•	•	•	•
Defeito em rolamento	√	◇	◇	◇	◇
Cavitação	√	•	•	◇	•
Defeito em m. eléctrico	√	◇	•	•	•
Defeito em engrenagem	√	•	◇	◇	◇
Defeito em transmissão	√	◇	•	•	◇

Legenda: √ Prática de monitorização de condição adequada à deteção do defeito

◇ Prática de monitorização de condição parcialmente adequada à deteção do defeito

• Prática de monitorização de condição não adequada à deteção do defeito

Tabela 3 - Comparação das técnicas mais utilizadas na deteção de avarias

A análise de vibrações engloba várias técnicas, umas mais simples que apenas detetam a falha, outras, as chamadas técnicas avançadas, que possibilitam a deteção do componente responsável pela avaria e/ou qual o tipo de anomalia.

A análise de vibrações, tal como qualquer outra técnica, também apresenta algumas desvantagens, nomeadamente:

- Necessidade de formação e qualificação, tanto para a sua aplicação como principalmente para a interpretação dos resultados obtidos;
- Os resultados das medições podem sofrer alterações causadas por elementos externos, ou seja, as medições podem ser afetadas por outras fontes de vibração, que se encontrem próximas do equipamento que está a ser analisado [56].

3.1 Conceitos teóricos

Segundo [57], a maior parte dos equipamentos possui uma vibração característica, pelo que, quando se procede à medição das vibrações de um determinado sistema, é possível identificar falhas causadas essencialmente por: desequilíbrios, desalinhamentos, desapertos, defeitos em rolamentos, defeitos em acoplamentos e defeitos em transmissões. Podem ainda observar-se desgastes/excentricidades em engrenagens, forças aerodinâmicas e hidrodinâmicas, forças eletromagnéticas, aperto/fixação deficiente, atrito ou ressonância.

Segundo [58], é possível definir vibração como um movimento oscilatório em torno de uma posição inicial. Esta manifesta-se sempre que ocorra uma força de excitação interna ou externa. A amplitude de vibração depende da intensidade da força de excitação, da massa e rigidez do sistema e do amortecimento do sistema. Num equipamento rotativo sempre que o centro de massa não coincida com o centro de rotação, poderá haver vibrações. Os equipamentos vibram devido, não só às forças externas que fornecemos, como por todas aquelas que são geradas pelo efeito da rotação dos seus componentes e afetadas pelas tolerâncias inerentes dos seus elementos construtivos. Assim, equipamentos semelhantes, operando nas mesmas condições produzirão características de vibração semelhantes, pelo que uma mudança na vibração básica, operando em condições normais, constituirá uma indicação de que existe alguma anomalia num dos seus elementos”.

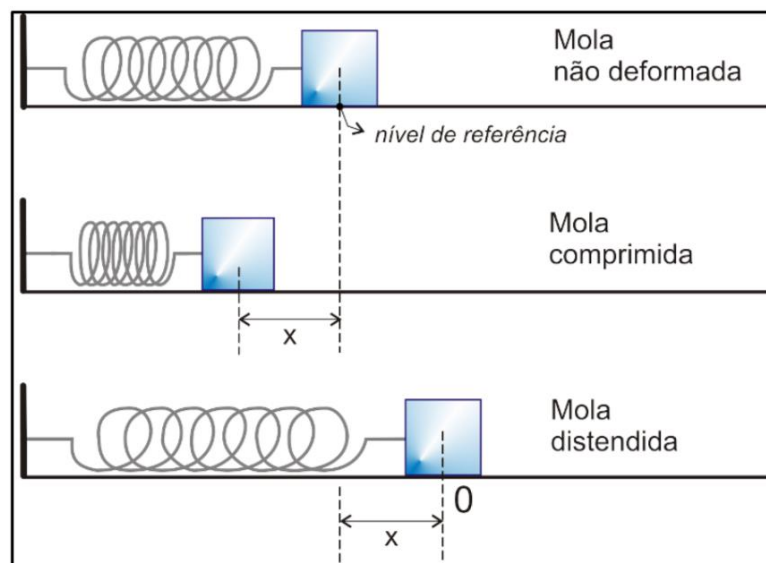


Figura 5 - Sistema massa-mola [59]

A Figura 5 permite ilustrar o modo mais simples de uma vibração e, conseqüentemente de um movimento oscilatório. Trata-se do sistema massa-mola onde o movimento é provocado pela compressão ou alongamento da mola através do deslocamento da massa.

A vibração ocorre quando a massa é deslocada da sua posição de equilíbrio, provocando a reação da mola com um movimento contrário, força de restituição, alongando-se até uma determinada distância, à direita da posição de equilíbrio. Quando este processo se repete trata-se de um movimento oscilatório. Neste caso, a vibração designa esse movimento como um movimento harmónico simples, como se pode observar na Figura 6.

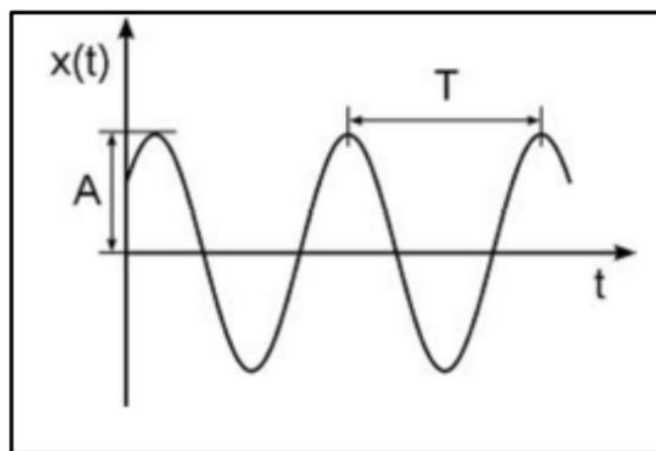


Figura 6 - Movimento harmónico simples [59]

Nesta figura é possível verificar algumas das características básicas fundamentais, utilizadas na análise de vibrações, ou seja, o período (T) e a amplitude (A). O período refere-se ao tempo que é necessário para concluir um ciclo, o qual pode também ser determinado pelo inverso da frequência. A frequência compreende o número de vezes em que ocorre um movimento completo, num determinado tempo.

A frequência pode ser expressa em:

- Ciclos por segundo (Hz);
- Ciclos por minuto (CPM);
- Ordens, que correspondem ao número de ciclos por rotação da máquina.

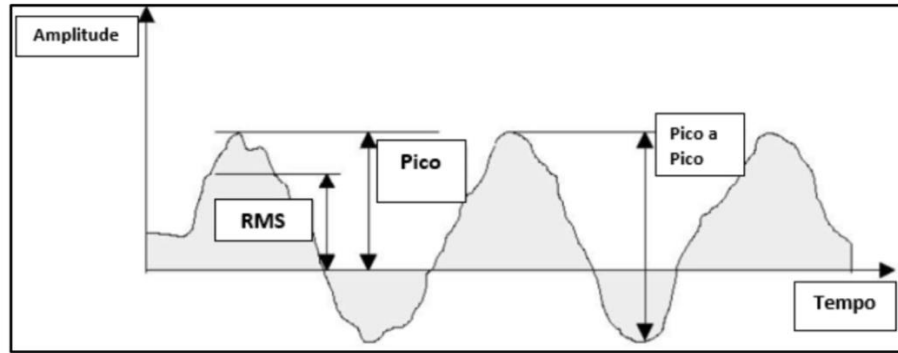


Figura 7 - Representação da amplitude [59]

A amplitude de vibração indica o estado do equipamento, ou seja, a severidade da vibração. Assim, quanto maior for este parâmetro maior é a complexidade do problema. Na Figura 7, é possível ver a representação da amplitude que pode ser expressa em valor de pico, pico a pico e valor eficaz (RMS). O RMS (*Root Mean Square*), é o valor mais relevante para definir a amplitude de vibração, uma vez que tem em conta a evolução do sinal no tempo. Por outro lado, encontra-se diretamente relacionado com a energia contida na vibração, e como tal, consegue exprimir a capacidade destrutiva do sinal vibratório (severidade da vibração). Este termo é muito utilizado quando as vibrações são aleatórias, ou possuem um número de vibrações sinusoidais com diferentes frequências.

Assim, o valor de pico equivale ao valor máximo numa direção, positiva ou negativa, a partir do zero.

O valor de pico a pico, indica a distância entre o pico máximo e o pico mínimo e corresponde assim ao percurso máximo da onda.

A expressão seguinte determina o valor de RMS de um sinal $x(t)$ [60]

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T x^2(t) dt}{T}} \quad (1)$$

T representa o período do sinal $x(t)$. Caso o movimento seja harmónico (sinal sinusoidal), o valor de RMS será 0.707 do valor de pico.

Na prática, não existe apenas uma frequência característica, mas uma frequência para cada componente rotativo da máquina. Nestas condições a forma de onda resultante, não será uma senoide e pode ser bem mais complexa, como se pode ver na Figura 8.

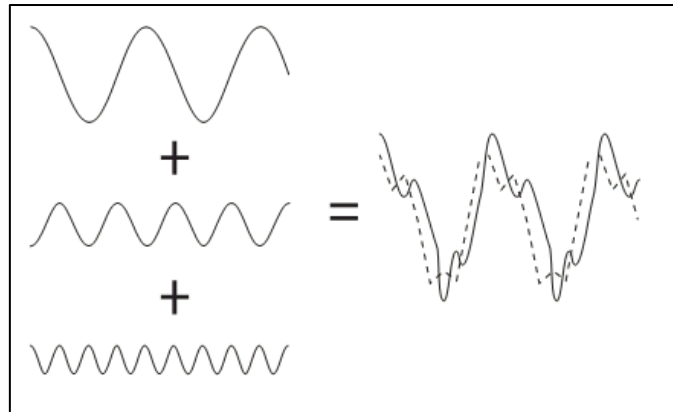


Figura 8 - Vibração característica de cada componente da máquina [61]

Esta representação de fenômenos vibratórios, no domínio do tempo, especialmente quando as fontes de sinal são várias, dificulta a interpretação do que está a acontecer. Uma estratégia facilitadora da análise do sinal, é passar do domínio do tempo para o domínio da frequência, onde a amplitude da frequência característica de cada componente vai aparecer bem discriminada, como se pode ver na Figura 9.

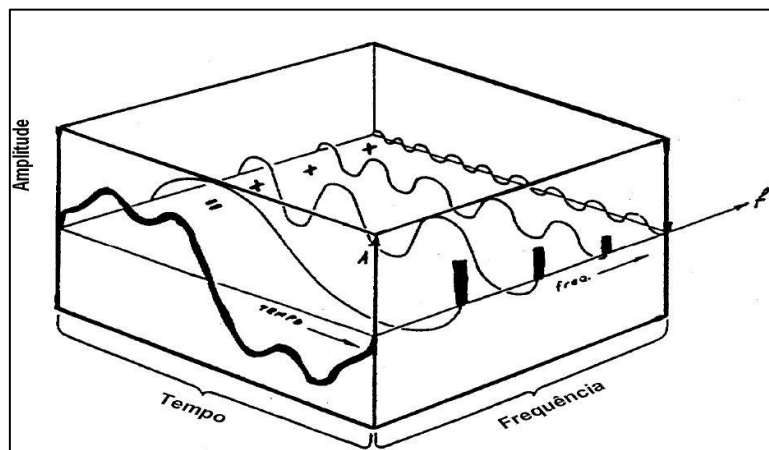


Figura 9 - Domínio do tempo e da frequência [61]

Assim, para se identificar um defeito em particular, temos de identificar a frequência característica desse defeito. Existem vários algoritmos para passar do domínio do tempo para o domínio da frequência, sendo a transformada de Fourier e as *Wavelets* bastante generalizadas.

A mais comum nas vibrações é a transformada de Fourier (FFT), mais precisamente o algoritmo FFT, que calcula a transformada discreta de Fourier num intervalo de tempo. [62]

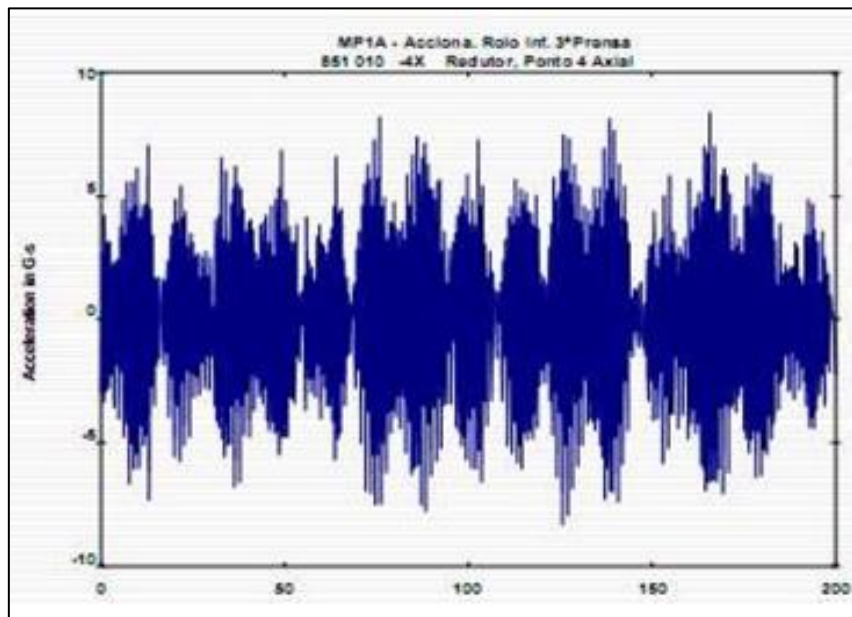


Figura 10 - Sinal no domínio do tempo [61]

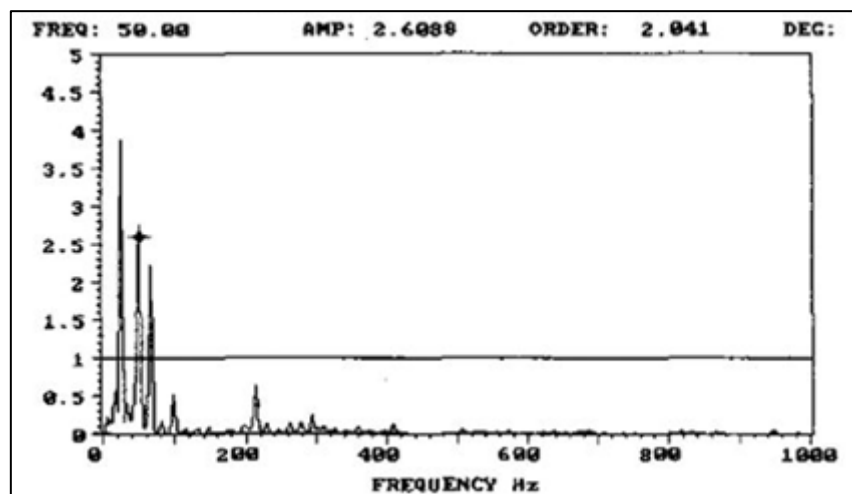


Figura 11 - Sinal no domínio da frequência [61]

As figuras 10 e 11, são exemplos do sinal em tempo e em frequência, obtidos em equipamentos, usando sensores para aquisição de espectros de vibração.

Todas as falhas vão produzir um sinal com uma amplitude significativa na frequência característica do componente da máquina com defeito. Através da medição deste sinal é possível detetar e diagnosticar algumas avarias.

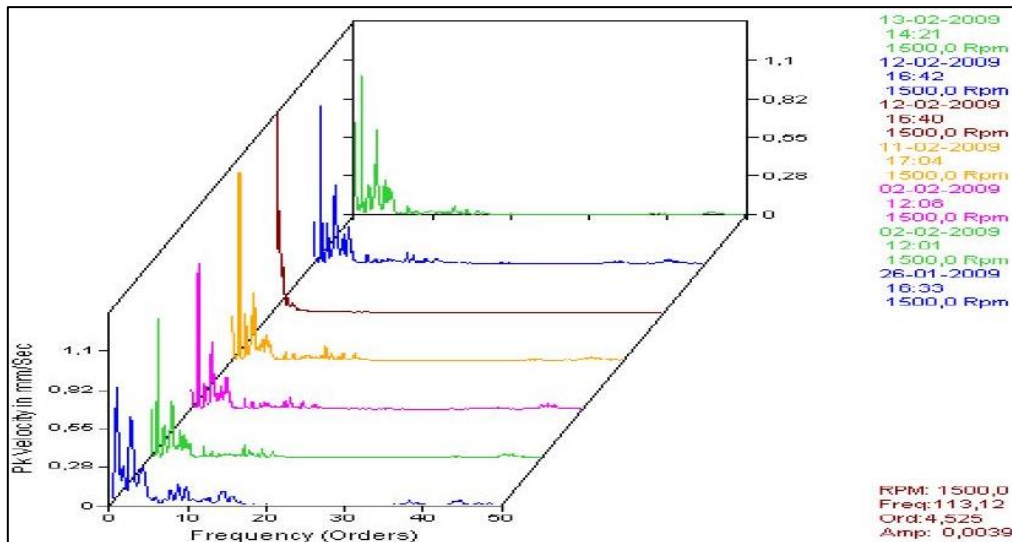


Figura 12 - Exemplo de diagrama em cascata [61]

Outras visualizações no domínio da frequência, podem ser de grande ajuda à detecção de um defeito em particular. Nestas técnicas é possível destacar entre outros a análise de envelope, a análise espectral, a análise do *Cepstrum*, o método de *Spike Energy*, o método do *Shock Pulse* e os diagramas em cascata, conforme a Figura 12.

3.2 Vibrações em equipamentos industriais – Principais causas

Existem diversas causas para o aparecimento de vibrações não desejadas em equipamentos, tais como:

- Desequilíbrio
- Desalinhamento
- Excentricidade
- Geradas por correias de transmissão
- Defeitos nas engrenagens
- Defeitos nas pás
- Desgastes/
- *Dry whirl*
- Ressonâncias

No caso de equipamentos rotativos os desequilíbrios (Figura 13), são uma das fontes mais comuns de vibração. Os desequilíbrios existem quando a distribuição de massas não é uniforme

em relação a um eixo, criando uma força centrífuga que causa vibração. O desequilíbrio pode ser causado por: defeitos de fabrico, erros de desenho, falhas de desempenho, ou estar relacionado com a manutenção, pás do ventilador deformadas ou sujas, falta de pesos de equilíbrio. À medida que a velocidade da máquina aumenta, os efeitos do desequilíbrio tornam-se maiores. O desequilíbrio pode reduzir significativamente a vida útil dos rolamentos, assim como causar vibração indevida na máquina.

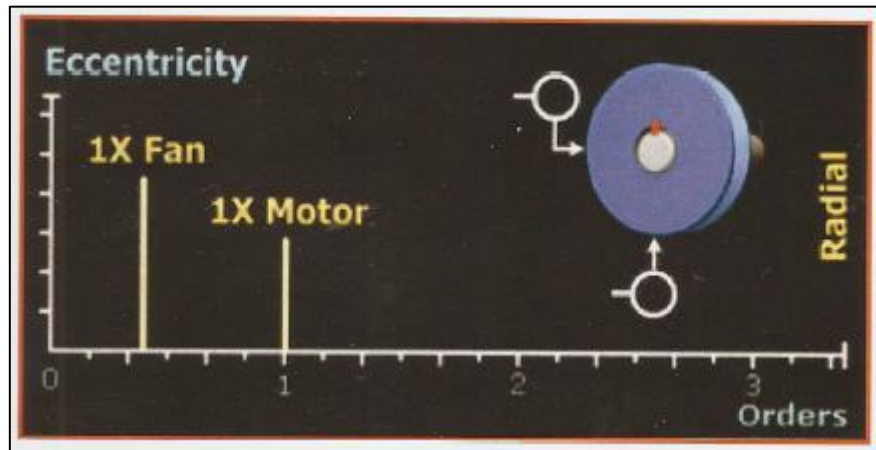


Figura 13 - Espectro tipo de equipamento com um desequilíbrio [63]

Na maioria dos casos deteta-se uma alta amplitude no espectro, exatamente na frequência de rotação do equipamento, sendo que nas direções radiais a sensibilidade é maior. Como a amplitude de vibração é diretamente proporcional ao grau de desequilíbrio, através da medição de vibrações é possível verificar a influência da adição de pesos aos rotores, para que seja mantido o seu equilíbrio.

Outra forma eficaz de identificação de um desequilíbrio criado por uma massa, é que a amplitude da mesma é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do rotor. A variação de rotação até à paragem completa, cria uma curva de amplitude de vibração do tipo exponencial inversa, onde a massa em desequilíbrio tem uma influência cada vez menor, devido à diminuição velocidade de rotação.

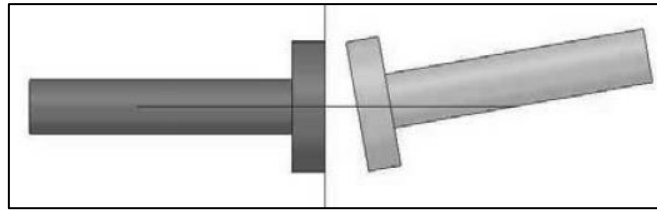


Figura 14 - Desalinhamento Angular [64]

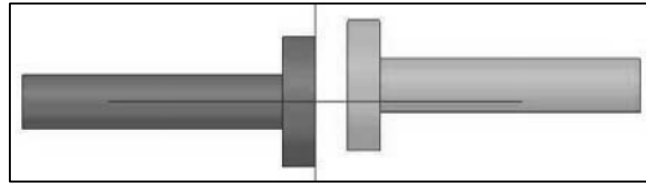


Figura 15 - Desalinhamento offset [64]

As vibrações causadas por desalinhamentos devem-se normalmente a um desgaste prematuro do equipamento, fisicamente corresponde à não linearidade nas linhas de centro de rotação de dois eixos. O desalinhamento angular ocorre, por exemplo quando os eixos de um motor ou de uma bomba não são paralelos (Figura 14), o desalinhamento offset verifica-se quando os eixos estão paralelos, mas não exatamente alinhados (Figura 15). O desalinhamento pode ser causado durante a montagem, ou pode desenvolver-se com o tempo, devido à expansão térmica, à deslocação de componentes ou montagem incorreta depois de uma manutenção. A vibração decorrente deste problema pode ser radial ou axial, dependendo do eixo da máquina, ou ambas.

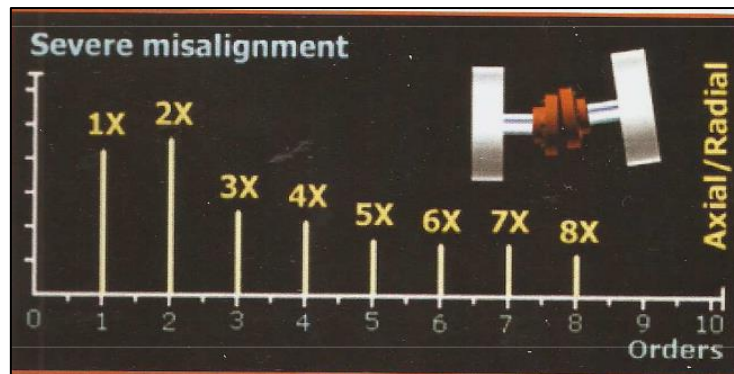


Figura 16 - Espectro tipo de desalinhamento angular [63]

A identificação do tipo desalinhamento é possível através da análise das altas frequências de vibração. Este gera picos em 1 X a frequência de rotação e/ou 2 X a frequência de rotação (Figura 16) e alterações da vibração na frequência de rotação, evidenciando assim o tipo desalinhamento.

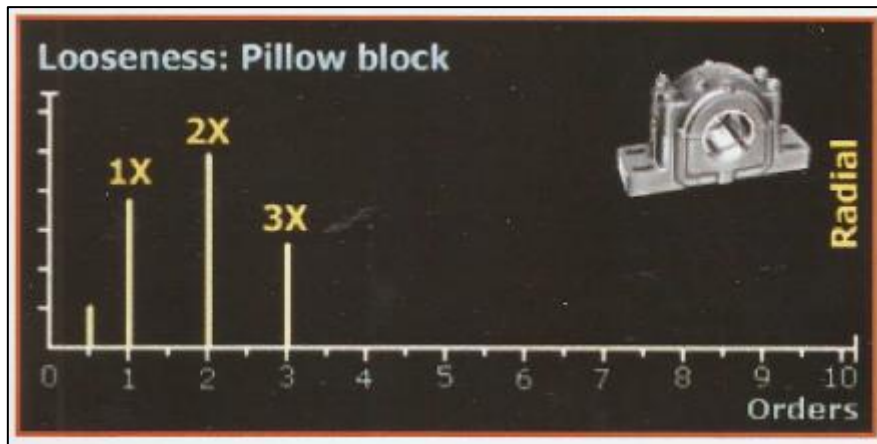


Figura 17 - Espectro tipo de equipamento com folgas de aperto num componente [63]

As folgas mecânicas (Figura 17) aparecem, geralmente em frequências múltiplas da velocidade de rotação do eixo. A característica mais importante é o aumento da vibração na direção de fixação, quase sempre na vertical, seguida do aparecimento de uma vibração em $\frac{1}{2}$ x RPM. As folgas mecânicas podem ser classificadas em três tipos:

- Tipo A: São folgas estruturais ou de falta de rigidez na fundação, na placa de base ou no pé da máquina. As vibrações verticais na base do equipamento são normalmente desfasadas de 180° .
- Tipo B: São folgas devido a parafusos mal apertados, fendas nos alicerces ou nos casquilhos.
- Tipo C: São folgas geradas por fixação inadequada entre as partes do equipamento. Com a ação das forças dinâmicas do rotor surgem efeitos não lineares, alterando periodicamente a rigidez do sistema. Assim, as vibrações terão características idênticas a uma pancada incompleta e aparecerão componentes sub-harmónicas. Também são deste grupo as folgas entre a bucha e a capa do casquilho, entre o anel interno do rolamento e o eixo, ou entre o anel externo e a capa do casquilho. As medidas de fase são geralmente instáveis e podem variar bastante de um ponto de medida para outro.

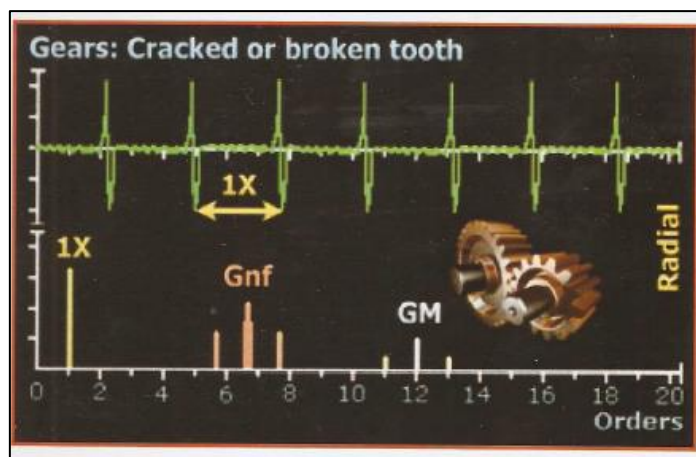


Figura 18 - Espectro tipo de equipamento com falhas nas engrenagens [63]

Nos equipamentos onde existam defeitos nas engrenagens (Figura 18), os picos de vibração estão normalmente na frequência da velocidade do eixo e na frequência de engrenamento.

É possível encontrar picos de vibração em 2 e 3 vezes a frequência de engrenamento, com possibilidade de existência de bandas laterais de velocidade do eixo em torno da frequência de engrenamento.

É possível existir um pico na frequência natural das engrenagens. Essas frequências serão mais proeminentes na direção radial para engrenagens de dentes retos e na direção axial para engrenagens helicoidais.

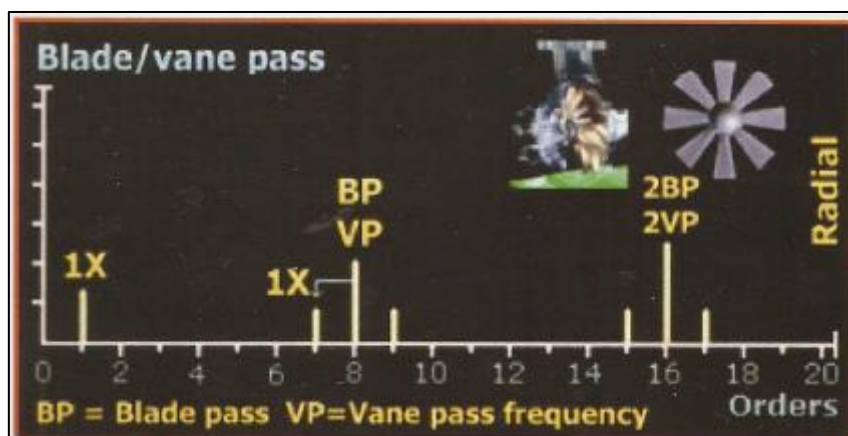


Figura 19 - Espectro tipo de equipamento equipado com alhetas ou ventoinhas

As bombas, ventiladores e compressores têm normalmente um pico no espectro da frequência de "passagem da lâmina" ou "passagem da alheta" (Figura 19). Esta frequência é definida pelo número de lâminas multiplicado pela velocidade de rotação do eixo.

A amplitude do pico pode variar no sentido ascendente, se o espaço entre as lâminas/alhetas e os difusores estacionários não for mantido. Caso haja obstruções e/ou curvas acentuadas no trajeto do fluido, haverá também uma alteração da frequência de vibração.

Frequência da alheta (BP) = Número de palhetas x RPM

Frequência da lâmina (VP) = Número de lâminas x RPM

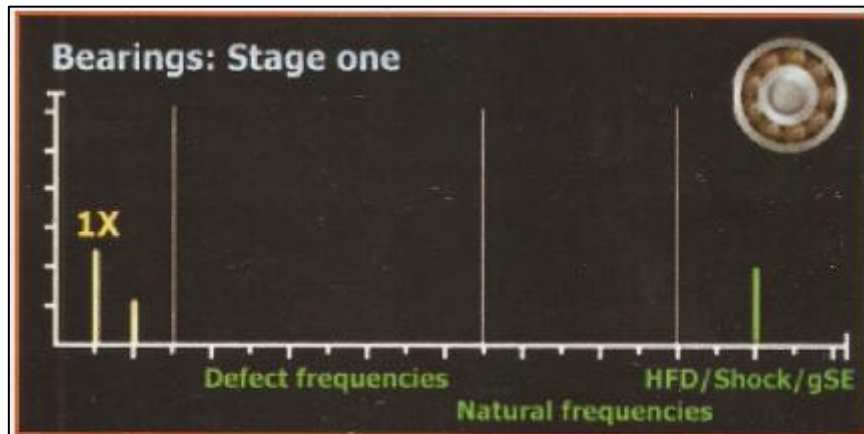


Figura 20 - Espectro tipo de equipamento com defeito num rolamento - 1º estágio [63]

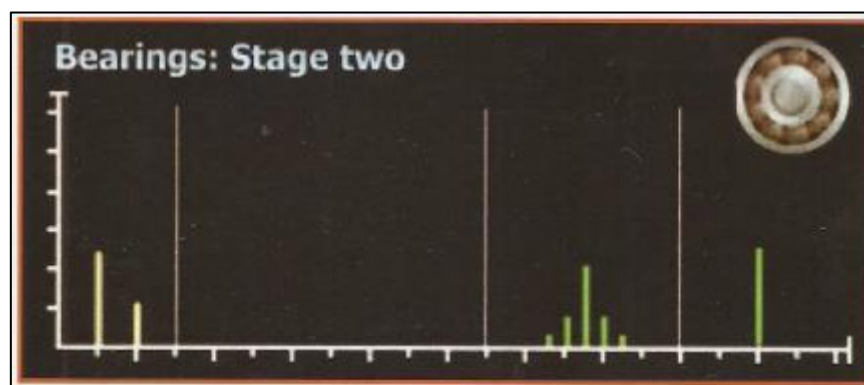


Figura 21 - Espectro tipo de equipamento com defeito num rolamento - 2º estágio [63]

As altas frequências de vibração, aparecem devido aos defeitos nas pistas dos rolamentos (Figura 20 e Figura 21), causadas pela passagem das esferas ou rolos. Estas frequências são várias vezes a velocidade de rotação do eixo. A razão para estas altas frequências e instabilidades, encontradas em casquilhos de rolamentos defeituosos, pode ser explicada analisando a natureza das forças de excitação geradas pelos elementos do rolamento. Um exemplo disso é a vibração gerada por um rolamento com um defeito numa esfera. O defeito entra sequencialmente em contacto com as pistas interna e externa, resultando numa vibração com uma frequência 2 X superior à frequência de rotação da esfera em torno do seu centro.

Como a rotação da esfera é muito maior que a rotação do eixo do rolamento, a vibração resultante terá uma alta frequência quando comparada com a frequência de rotação deste eixo. A amplitude da vibração dependerá da extensão da falha no rolamento. Já os defeitos na gaiola do rolamento irão gerar vibrações em frequências bem mais baixas do que aquelas correspondentes aos defeitos das esferas, e das pistas interna ou externa, como afirma [65].

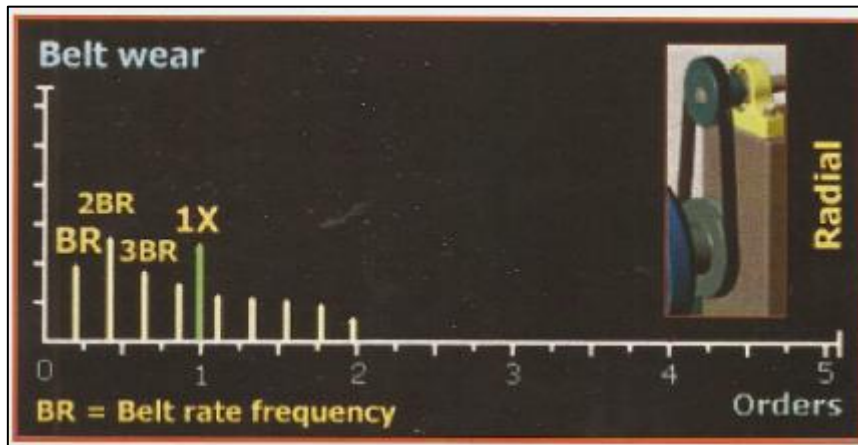


Figura 22 - Espectro tipo de equipamento com defeito na correia de transmissão [63]

Na transmissão de potência (Figura 22), são por vezes usadas correias de transmissão em vez de engrenagens ou correntes, devido à sua boa capacidade de absorção de choques e ruídos. No entanto estas são uma fonte de vibração às quais se podem associar dois tipos de problemas:

- Reação da correia a outras forças de perturbação no equipamento.
- Vibrações devido aos problemas que se fazem sentir na própria correia.

A frequência de vibração é o fator chave para a determinação da natureza da vibração da correia, porque quando comparada com a frequência de perturbação, permite concluir se a correia está ou não a vibrar devido a outras forças de perturbação. As vibrações resultantes de defeitos na própria correia ocorrem a frequências que são múltiplos diretos da velocidade de rotação da correia. As vibrações mais usais ocorrem nas frequências 1,2,3, X RPM da correia, são múltiplos diretos da velocidade de rotação. Esta característica permite distinguir facilmente os defeitos que ocorrem devido a falhas existente nas correias.

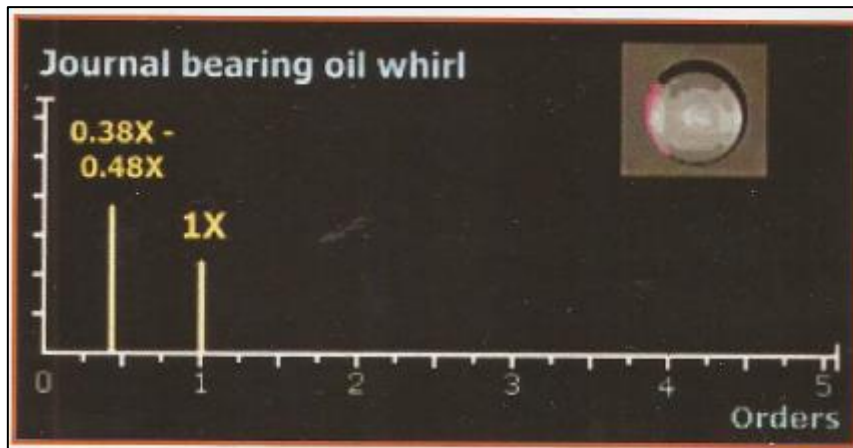


Figura 23 - Espectro tipo de equipamento com vibração excessiva devido a um vórtice de óleo [63]

Os vórtices de óleo de lubrificação (Figura 23), são um problema associado às chumaceiras de casquilhos, quando por vezes na manutenção do equipamento as chumaceiras são substituídas por umas inadequadas para o equipamento, tendo o equipamento trabalhado sempre bem, até esta manutenção. A tendência para o desenvolvimento de vórtices de óleo de lubrificação depende em parte da extensão da excentricidade do veio entre chumaceiras. Caso a chumaceira se encontre perfeitamente centrada no veio, não é suscetível serem criados vórtices de óleo de lubrificação. Quando estamos na presença destes vórtices devem verificar-se as pressões, viscosidades e temperatura do óleo, para que não haja dúvidas de que se está a utilizar o óleo correto. Quando existem falhas de lubrificação numa chumaceira de casquilhos, estas dão origem a uma vibração excessiva devido ao atrito entre o veio de rotação e a chumaceira estática. Este fenómeno é conhecido como vórtice seco/*dry whirl* as vibrações resultantes deste fenómeno ocorrem geralmente a elevadas frequências, produzindo um ruído bastante audível. [2]

3.3. Sistemas e Instrumentos para Medição de Vibração

Segundo [66], os sistemas de instrumentação para a monitoração periódica de vibração podem ser classificados em vários níveis. Os utilizados nesta dissertação são:

- Medidor de vibração de Nível Global
- Medidor de vibração com Análise de Frequência

3.3.1. Equipamento para medição da Vibração em Nível Global

Os medidores de vibração de nível global são um instrumento que permite medir o valor global de vibração (em valor de pico ou de RMS), em uma gama de frequência extensa, que depende das normas a aplicar. Este instrumento mede a vibração total resultante da ação de todas as frequências presentes no sinal de vibração, dentro da gama de frequência considerada. As medições são comparadas com a norma ou valores de referências previamente estabelecidos.

Este tipo de instrumento possui a capacidade de medir o valor de RMS, pico de velocidade, deslocamento e por vezes aceleração, numa gama de 5 Hz a 5.000 Hz. Caso não existam valores de referência, as medições do RMS podem ser compradas com o valor indicado pela norma e caso necessário indicar que seja efetuada uma ação de manutenção.

O medidor de vibração de nível global tem uma capacidade muito grande de deteção do mau funcionamento do equipamento a medir, mas não permite facilmente a identificação e diagnóstico, tarefas que devem ser realizadas por medidores de vibração com análise de falhas ou análises de frequência.

3.3.2. Equipamento para medição de vibração com Análise da Frequência

A utilização de equipamento que permite a medição, análise e separação das frequências no sinal de vibração, possibilita o diagnóstico e previsão de falhas do sistema analisado. Através do estudo do sistema é possível relacionar cada componente da frequência com o comportamento dinâmico dos elementos do equipamento.

O aumento dos valores de amplitude não fornece apenas a indicação de falhas, mas também a frequência em que elas ocorrem, havendo um conhecimento do equipamento e do sistema é possível diagnosticar o que se está a degradar. O registo do aumento dos níveis de frequência sobre um número de medidas periódicas, possibilita a monitoração da tendência dos níveis dessas componentes em função do tempo para as falhas em desenvolvimento.

A curva resultante dessa medição periódica é conhecida por gráfico de tendência (Figura 24), que permite extrapolar quando a condição atingir os limites que obriguem a uma manutenção programada.

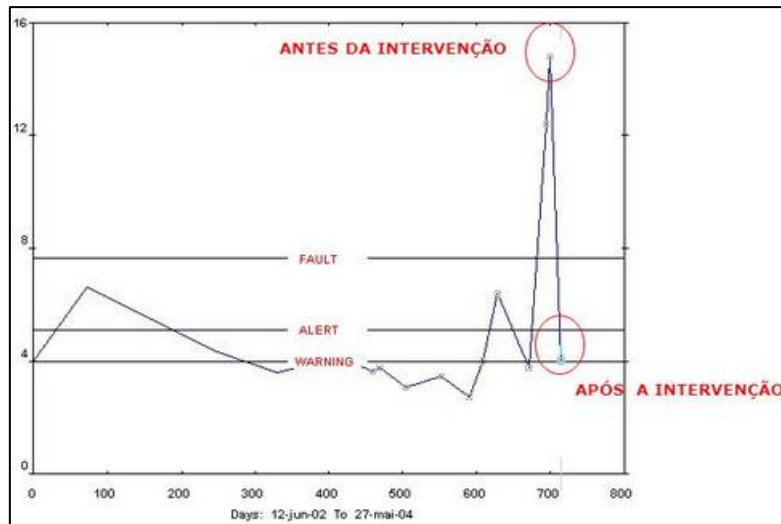


Figura 24 - Gráfico de tendência [67]

4. Termografia

Segundo [49], a técnica de termografia baseia-se no facto de que todos os objetos, com uma temperatura acima do zero absoluto, emitem radiação pelo que esta técnica utiliza equipamentos de medição específicos para controlar a emissão de radiação infravermelha (temperatura), com o objetivo de avaliar a condição do equipamento que está a ser analisado.

Assim, ao efetuar uma leitura podem-se detetar anomalias térmicas, ou seja, detetar zonas ou pontos mais quentes ou mais frios que o padronizado, o que permite a identificação e localização de possíveis problemas no sistema em causa. Atualmente, existem instrumentos com elevada sensibilidade, que permitem medir pequenas variações de temperatura em relação à condição padrão.

A termografia é utilizada com frequência em várias áreas, tais como a engenharia, a medicina, a aviação e outras, sempre que as ações decorrentes do seu funcionamento originem uma variação de temperatura.

Segundo [68], a termografia é especialmente útil no campo da manutenção preventiva, tendo-se tornado numa das técnicas de eleição para inspeção de sistemas/equipamentos. Afirma [69], esta técnica pode ser subdividida em termografia ativa e em termografia passiva. A termografia ativa consiste na aplicação de uma tensão térmica num determinado objeto a analisar e a recolha de dados é feita durante o aquecimento e/ou arrefecimento. Na termografia passiva não há

qualquer intervenção no sistema/equipamento, os dados são recolhidos na temperatura normal de funcionamento do mesmo.

A alteração da temperatura de funcionamento pode ter origem no próprio equipamento em consequência do seu funcionamento, ou ser aplicada propositadamente por radiação e/ou condução para a deteção de descontinuidades. Em ambas as situações é essencial conhecer a distribuição da temperatura do objeto a analisar, de forma a estabelecer um referencial de comparação [70].

A termografia é considerada uma das técnicas base para a manutenção condicionada, uma vez que na maioria dos casos é uma técnica de aplicação acessível e que permite aumentar a capacidade de deteção de falhas. De outra forma estas poderiam resultar em enormes prejuízos. Acima de tudo trata-se de uma técnica que permite um enorme aumento do nível de segurança, tanto para quem efetua os testes, como para quem opera os equipamentos, como afirma [71].

4.1 Evolução Histórica

O estudo da termografia remonta ao final do século XVI, quando em Nápoles, Giambattista della Porta, iniciou algumas experiências óticas. Dois séculos mais tarde, em Hanôver, William Herschel utilizando um espectroscópio, descobriu que o sol emitia raios infravermelhos. Esta descoberta e a sua relação com a luz só se tornariam úteis a partir de meados do século XIX, quando o seu filho John Herschel (Figura 25), um pioneiro no campo da fotografia, produziu em papel a primeira termografia, por meio da técnica de evaporografia, ou seja, através da evaporação do álcool obtida de uma superfície pintada com carbono.



Figura 25 - Sir William Herschel (Fonte: google)

Em 1843, em França, Henry Becquerel, prémio nobel da física, descobriu que certas substâncias emitiam luminescência quando expostas à radiação infravermelha, além de que poderiam ser produzidas emulsões fotográficas, sensíveis à radiação próxima do infravermelho. [72]

Em 1880, nos EUA, Samuel Langley produziu o primeiro bolómetro, um aparelho capaz de medir ínfimas diferenças de temperatura, por meio da variação da resistência elétrica de um metal com a variação da sua temperatura. Esta técnica utilizava uma ponte de Wheatstone, uma fina tira de platina escurecida era ligada a um dos seus braços, cuja condutividade elétrica variava quando aquecida por uma radiação incidente. Com esse bolómetro era possível detetar o calor emitido por uma vaca a uma distância de aproximadamente 400 metros.

Em 1917, foi desenvolvido o primeiro detetor baseado na interação direta entre fótons da radiação infravermelha e eletrões do material (sulfato de tálio), cuja sensibilidade e tempo de resposta eram superiores às do bolómetro.

O primeiro termograma foi elaborado em 1929, por Marianus Czerny que inventou o *Evaporograph*. O *Evaporograph*, era um sistema de processamento de imagens infravermelhas que utilizava uma fina película de óleo volátil aplicado a uma fina membrana absorvente, que se baseava na evaporação diferencial do óleo.

Durante a Segunda Guerra Mundial, foi utilizado o Sistema de Visão Noturna em tanques alemães para a invasão da URSS. A resposta dos aliados foi a elaboração e o desenvolvimento da FLIR, utilizada pelo exército americano na localização dos inimigos. A utilização deste sistema não se limitou à localização de tropas, incluindo também o desenvolvimento de armamento (mísseis) com detetores de calor.

Em 1946, surgiu o primeiro scanner de infravermelhos de uso militar, com a característica da produção de um termograma em horas e em 1954, já era possível este sistema gerar uma imagem em duas dimensões em 45 minutos.

Nas décadas de 60 e 70, houve um salto significativo com o desenvolvimento de scanners infravermelhos e o lançamento de sistemas integrados de formação de imagens térmicas instantâneas. A imagem era gerada em 5 minutos, com a determinação de temperatura.

Em 1975, foi desenvolvido um sistema que permitia a visão termográfica e a visão ótica simultaneamente. Este sistema foi denominado ENOUX e baseava-se num sistema elétrico ótico. Em 1990, a imagem em tempo real já era uma realidade comum e a redução no tempo de produção da imagem acompanhou o avanço nos equipamentos de captura e tratamento da imagem.

Com a substituição dos sistemas de refrigeração de nitrogénio líquido, pelos sistemas de refrigeração termoelétricos, associada ao uso da computação, programas e equipamentos, foram lançados termo-visores mais compactos e versáteis. O salto tecnológico ocorre com o aparecimento do *Charge Coupled Device* (CCD) de seguida com os *Focal Plane Arrays* (FPAs), tal como indicam os autores de [73] e [74]

4.2 Introdução Teórica

Podemos definir o espectro eletromagnético como todos os tipos de radiação eletromagnética, conhecida até à data.

Para além da energia que a radiação contém, também é medida a frequência e o comprimento de onda. Estas três grandezas encontram-se matematicamente relacionadas pelas equações seguintes:

$$f = c/\lambda \quad (1)$$

$$E = hc/\lambda \quad (2)$$

$$f * \lambda = C \quad (3)$$

Onde:

- f – Frequência [Hz]
- c – Velocidade da luz no vácuo [m/s]
- λ – Comprimento de onda [m]
- E – Energia [J]
- h – Constante de Planck [eV]
- C – Constante – Velocidade da luz - $3,0 \times 10^8$ m/s

A distinção da radiação de acordo com a sua frequência está representada na Figura 26, assim como a gama de frequências que penetram a atmosfera.

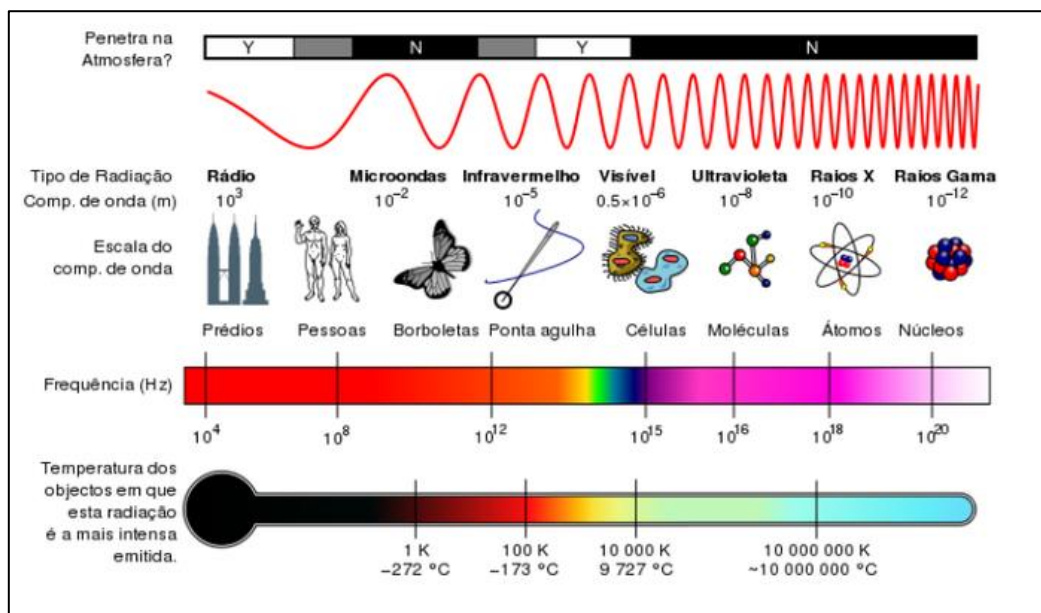


Figura 26 - Frequências do espectro eletromagnético. [75]

A energia e comprimento de onda que as diferentes radiações do espectro possuem está representada na Tabela 4.

	Comprimento de onda [m]	Frequência [Hz]	Energia [J]
Radio	$> 1 \times 10^{-1}$	$< 3 \times 10^9$	$< 2 \times 10^{-24}$
Micro-ondas	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{-24} - 2 \times 10^{-22}$
Infravermelho	$7 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{-22} - 3 \times 10^{-19}$
Visual	$4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-19} - 5 \times 10^{-19}$
Ultravioleta	$1 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{-19} - 2 \times 10^{-17}$
Raio-X	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{-17} - 2 \times 10^{-14}$
Raio-gama	$< 1 \times 10^{-11}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 2 \times 10^{-14}$

Tabela 4- Comprimento de onda, frequência e energia que compõem a radiação do espectro eletromagnético.

Tal como podemos observar na Tabela 4, existe uma significativa quantidade de energia que se liberta na gama dos infravermelhos que não é visível a olho nu.

A transferência de calor pode ser efetuada por condução, transferência de calor direta entre dois corpos, estando um deles no estado sólido, convecção, transferência de calor direta entre um corpo e um líquido ou gás, e radiação, transferência de calor indireta entre dois corpos. Qualquer corpo que se encontre a uma temperatura superior a 0 K emite radiação infravermelha [76].

Uma câmara termográfica (Figura 27), também denominada por câmara de infravermelhos, é capaz de detetar radiação infravermelha e convertê-la em radiação visível. Tal como já foi referido, o comprimento de onda da radiação infravermelha é maior do que a radiação visível. Este tipo de equipamento trabalha num comprimento de onda que inclui a radiação infravermelha e a radiação visível.



Figura 27 - Exemplos de uma câmara termográfica (Fluke)

A câmara é composta por uma lente ótica e um detetor de infravermelhos. O sinal é processado eletronicamente através da colocação em fase de todos os sinais com o mesmo comprimento de onda, que refletem ou são transmitidos por uma superfície bidimensional. Para se colocarem as ondas em fase é necessário alinhar os feixes de radiação ou alterar a direção do

sensor. Este controlo dinâmico é efetuado sem recorrer a nenhuma parte móvel, utilizando um *hardware* vulgarmente denominado por OPA. O elemento detetor vai criar um padrão detalhado de temperaturas intitulado por termograma. Este processo demora cerca de um terço de um segundo¹ e são obtidos milhares de pontos. Este termograma é posteriormente convertido em sinais elétricos. Os impulsos são enviados para uma unidade de processamento de sinal, que é composto por um circuito dedicado, que traduz a informação que recebe em elementos para poder ser representada graficamente. Este processo é efetuado continuamente e o resultado final das câmaras atuais é um filme em tempo real.

A equação (4) reproduz a lei de *Stefan-Boltzmann* que representa a troca de energia por radiação. Existem outras leis tais como a lei de *Kirchhoff*, de *Planck* e de *Wien*, que têm o mesmo fim, como indica [76]:

$$Q = A\varepsilon\sigma T^4 \quad (4)$$

Onde:

- Q – Potência [W]
- A – Área da superfície [m²]
- ε – Emissividade
- σ – Constante de Stefan-Boltzmann [Wm⁻²K⁻⁴]
- T – Temperatura [K]

A emissividade de um corpo varia de zero a um. Um corpo com emissividade nula, ou seja, um corpo branco, não absorve qualquer radiação. Por analogia, um corpo com emissividade máxima, ou seja, um corpo negro, absorve toda a radiação.

Existem três processos que podem ocorrer e que previnem que um dado objeto se comporte como um corpo negro. Nem toda a radiação é absorvida (α), parte desta é refletida (ρ) ou transmitida (τ). A soma destes três fatores é sempre um, para qualquer comprimento de onda (λ), como se pode ver na equação seguinte [76]:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (5)$$

¹ A primeira câmara demorava cerca de uma hora.

Segundo a Lei de *Kirchhoff* da radiação térmica, um corpo exposto a uma determinada temperatura e comprimento de onda, apresenta valores de emissividade (ε) iguais aos valores de absorção (α), pelo que temos a seguinte equação [77]:

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (6)$$

Podemos então definir a emissividade como a razão entre a energia emitida por um corpo real e a energia emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Com base neste pressuposto é possível concluir que a emissividade de um corpo negro é igual a um e a emissividade de um espelho perfeito é zero. O valor da emissividade para um corpo real é calculado através da Lei de *Stefan-Boltzmann* [76]:

$$E = \sigma\varepsilon T^4 \text{ [Watt/m}^2\text{]} \quad (7)$$

Onde:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ [Watt/m}^2 \cdot \text{K}^4\text{]}$$

Quanto mais elevada for a temperatura do corpo, maior é a radiação que vai emitir. É importante ficar a saber que a radiação está relacionada com a temperatura à quarta potência, ou seja, um acréscimo de 10 K vai resultar num aumento de 10 000 W.

4.3. Aplicações da termografia

A deteção de corpos quentes e respetiva temperatura através desta tecnologia, possui um vasto campo de aplicações, sendo possível obter resultados sem que haja contacto direto com os corpos a medir. Para além das aplicações militares em instalações de vigia fixas e móveis, as câmaras termográficas permitem encontrar corpos quentes através de densos fumos de um incêndio, detetar doenças crónicas tais como o cancro da mama (Figura 28), encontrar com elevada facilidade falhas elétricas (Figura 29), detetar rolamentos com elevadas forças de atrito

(Figura 30), e facilitar a deteção de muitos outros problemas vivenciados diariamente no sector industrial.

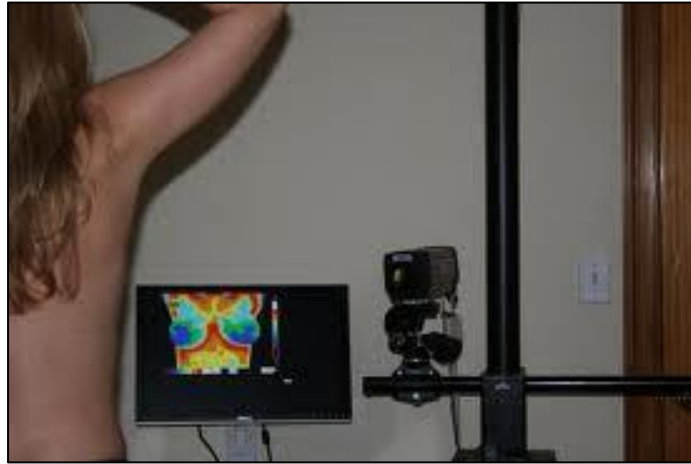


Figura 28 - Diagnóstico de doenças. [78]



Figura 29 - Energia térmica a radiar de um fusível. [79]

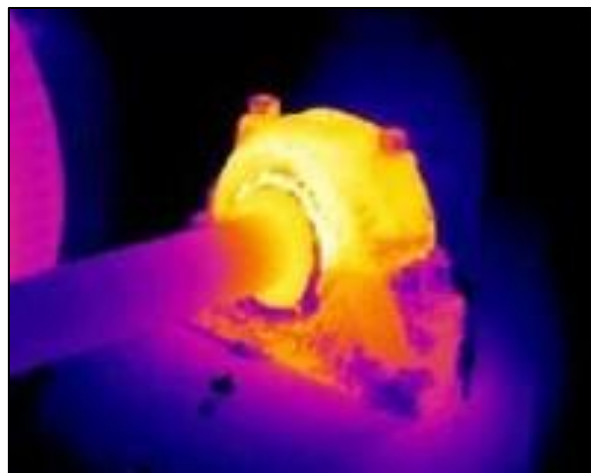


Figura 30 - Rolamento e chumaceira com uma possível falha. [80]

De acordo com [81], a termografia é na indústria automóvel no desenvolvimento e estudo do comportamento dos pneus, nos desembaciadores dos para-brisas, no estudo do comportamento dos travões, no estudo do sistema de refrigeração, no estudo do comportamento do turbo, entre outros. Na siderurgia esta técnica é aplicada no levantamento do perfil térmico dos fundidos, durante a solidificação e na inspeção de revestimentos refratários de fornos. Na indústria aeronáutica é utilizada no ensaio de materiais compostos para se detetar a dupla laminação ou outros tipos de ruturas, assim como pontos quentes e falhas de coesão em componentes elétricos e eletrónicos. Na indústria química a termografia é utilizada para a otimização de processos e no controlo de reatores e torres de refrigeração. As aplicações na engenharia civil incluem a avaliação do isolamento térmico de edifícios e a possibilidade de determinar detalhes construtivos, entre outros. Nas artes este método é uma grande mais valia na deteção de descascamento de pintura e de massas reconstituíntes, bem como no diagnóstico geral para conservação e restauro.

Outra importante vantagem das câmaras termográficas é a sua simplicidade de utilização e interpretação de dados. Permite efetuar ações preventivas antes do equipamento falhar, realizar avaliações térmicas de forma simples, detetar corpos móveis em tempo real e efetuar medições em áreas inacessíveis e/ou perigosas.

Esta tecnologia tem algumas limitações tais como a falta de precisão da medição da temperatura e a interferência do meio envolvente, nomeadamente em superfícies com reduzida emissividade. A presença de um vidro entre a câmara e o corpo, manifesta-se como um corpo negro, impedindo qualquer medição. As câmaras termográficas recebem na ótica a radiação de determinado objeto a medir, recebem também a radiação refletida, de várias fontes do ambiente e a emissão da própria atmosfera. Todos estes fatores afetam a precisão da medição.

Entre os dos diversos fatores que afetam a precisão e validação de um ensaio termográfico, encontram-se também as condições ambientais, que podem igualmente influenciar o resultado e a precisão da amostra.

A quando da realização dos ensaios devem ser tidos em conta os seguintes aspetos [82]:

- O aumento da temperatura ambiente irá resultar num aumento da temperatura medida no equipamento;

- Devido à humidade e/ou precipitação a temperatura pode baixar drasticamente, dando origem a uma interpretação errada dos dados. Equipamentos cuja temperatura normalmente seja por norma baixa, irão chegar a níveis bastante mais baixos, induzindo o operador em erro;
- Quanto aos meios de convecção normalmente, associados ao vento, atingem velocidades na gama dos 1-10 km/h, estes podem alterar significativamente os efeitos de refrigeração em instalações elétricas. Caso haja vento a uma velocidade acima dos 10 km/h pode resultar num decréscimo acentuado de temperatura entre equipamento e ambiente, conduzindo a leituras imprecisas;
- Equipamentos expostos à radiação solar, especialmente aqueles com níveis de absorção altos, irão funcionar como “máscaras”, não revelando as pequenas diferenças térmicas das instalações em análise.

Caso a opção de manutenção seja o sistema de manutenção condicionada preventiva utilizado a técnica de termografia, as variações de temperatura serão pequenas quando analisadas continuamente. Caso seja negligenciado o acima descrito o operador não irá ter resultados fiáveis, não obtendo informações necessárias para concluir se de facto o equipamento apresenta indícios de degradação.

Consoante as necessidades, o tratamento da radiação infravermelha pode ser concretizado de várias formas. Algumas opções de tratamento da radiação consistem na medição da temperatura, acompanhada por uma fotografia a cores. Este tipo de imagem, cuja resolução vulgarmente se encontra nos 160x120, 320x240 ou 640x512 pixéis, é a mais utilizada na manutenção preventiva condicionada e na medicina (Figura 31).

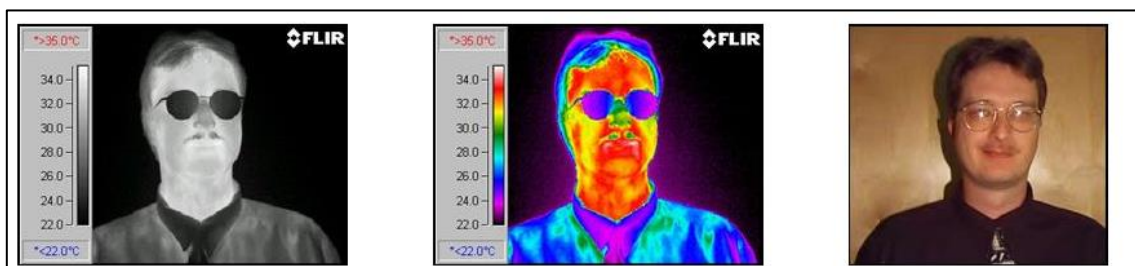


Figura 31 - Imagens termográficas a cinzentos, cores e fotografia natural.(Google)

4.4 Procedimentos de medição e análise termográfica

Existem dois tipos de procedimento termográficos para medição da condição dos equipamentos: a análise quantitativa e a análise qualitativa. Estes dois procedimentos são muito diferentes tanto no objetivo como nos resultados obtidos.

A análise qualitativa tem como principal objetivo indicar:

- Presença de uma anomalia;
- Ausência de anomalia.

Este tipo de análise é normalmente utilizada quando se pretende uma abordagem mais simplista da avaliação térmica do equipamento, apenas pela observação da imagem obtida com a câmara termográfica.

As imagens podem ser obtidas com emissividade fixa, uma vez que se pretende visualizar as diferenças de temperatura superficiais. A observação e análise podem ser feitas imediatamente e no local. Apesar desta simplificação, o estudo termográfico deve ser feito por um técnico qualificado, e com capacidade de interpretação dos resultados obtidos.

Para evitar erros de interpretação, é aconselhada a realização da uma avaliação térmica, nas zonas não afetadas do objeto em estudo.

Desde que as condições do ensaio e envolvente sejam idênticas, a avaliação do termograma do equipamento, pode ser feita por comparação com um termograma de referência, conforme indicado em [83].

A análise quantitativa é realizada tendo em consideração as temperaturas superficiais e alguns parâmetros analíticos. O operador deve estar mais familiarizado com os equipamentos, pois tanto a emissividade como a transmissividade e a refletividade influenciam a análise, conforme indicado em [84].

O ensaio termográfico requer mais detalhe e condições de ensaio mais rígidas, demorando mais tempo, mas demonstra ser mais eficaz que a análise qualitativa.

A Tabela 5 relaciona os dois tipos de análise (segunda coluna análise qualitativa e terceira coluna análise quantitativa), os níveis de propriedade e o tipo de ação recomendada

Níveis de prioridade (NP)	ΔT entre componentes semelhantes, com o mesmo intervalo de potência ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT em relação à temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	Ação Recomendada
4	1-3	1-10	Possível Anomalia, recomendado monitorizar o equipamento
3	4-15	11-20	Anomalia provável, reparar quando possível
2	>15	21-40	Anomalia encontrada. Monitorizar até ações corretivas possam ser aplicadas
1	>15	>40	Elevada diferença de temperatura. Reparar imediatamente

Tabela 5 - Esquema utilizado na análise qualitativa (segunda coluna) e da análise quantitativa (terceira coluna) [85]

5. Determinação de fatores de falhas – Desenvolvimento de método inteligente

Com o objetivo de facilitar as análises, desenvolveu-se um método inteligente que permite através de equações determinar o tipo de falha e a necessidade de intervenção.

Para a análise de vibrações foram criadas quatro equações que permitem verificar se estamos na presença de um defeito e qual a severidade do mesmo.

No caso da análise temperaturas, foi desenvolvido um método para verificar a necessidade de intervenção tendo em consideração, a temperatura medida inicialmente e a temperatura no momento da análise.

Para que se possa ter uma correta noção dos estados dos equipamentos é necessário um conhecimento prévio dos mesmos, só assim é possível comparar valores.

5.1. Desequilíbrio

Tendo em consideração o descrito no capítulo 3.2. e após análise do espectro obtido na medição, se o mesmo estiver de acordo com o da Figura 32, estamos na presença de um desequilíbrio. Na abordagem proposta nesta dissertação existe a necessidade de determinar o fator de desequilíbrio (F_{DQ}).



Figura 32 – Representação esquemática de FFT de um defeito de desequilíbrio [86]

$$RMS_P \left[\begin{matrix} n - x \\ n + x \end{matrix} \right] \quad (8)$$

$$F_{DQ} = \frac{1 - RMS_P}{1 - RMS_{TOTAL}} \quad (9)$$

Para determinação do FDQ é necessário encontrar o valor de pico da velocidade de rotação e definir o intervalo que vai ser analisado, tendo isto em consideração e tendo em conta os valores medidos anteriormente, antes da sua primeira utilização ou logo após uma reparação, é possível definir um valor de Y (Y=valor limite definido pelo utilizador).

$$\begin{cases} \text{Se } F_{DQ} \geq Y \rightarrow \text{Desequilíbrio} \\ \text{Se } F_{DQ} < Y \rightarrow \text{Equipamento Equilibrado} \end{cases}$$

Caso o valor de $FDQ \geq Y$ estamos numa situação de desequilíbrio e há necessidade de intervenção no equipamento. Caso $FDQ < Y$ o equipamento está a funcionar de acordo com o definido/preconizado pelo operador.

5.2. Desalinhamento

Após análise do espectro obtido na medição e sendo o mesmo de acordo com os espectros indicados na Figura 33 e Figura 34, o equipamento apresenta um desalinhamento que tanto pode ser um desalinhamento angular como *offset*, conforme indicado no capítulo 3.2.

Através da determinação do RMS entre as duas frequências indicadas no espectro, podemos verificar se estamos na presença de um desalinhamento do tipo angular ou do tipo *offset*

$$\left\{ \begin{array}{l} RMS_{P1} \\ RMS_{P2} \end{array} \begin{array}{l} [n_1 - x1] \\ [n_1 + x1] \\ [n_2 - x2] \\ [n_2 + x2] \end{array} \right\} = RMS_P; RMS_{P1} + RMS_{P2} = RMS_P \quad (10)$$

$$F_{DL} = \frac{1 - RMS_P}{1 - RMS_{TOTAL}} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \text{Se } F_{DL} \geq Y \rightarrow \text{Desalinhamento} \\ \text{Se } F_{DL} < Y \rightarrow \text{Equipamento Alinhado} \end{cases}$$

Tal como no caso anterior o valor de Y é definido pelo utilizador/fabricante do equipamento. Quanto mais próximo de zero for o valor de F_{DL} , maior o desalinhamento, isto porque quanto maior a diferença entre os valores de RMS, mais próximo de zero está o valor de F_{DL} . Esta condição apenas não é suficiente para identificar o tipo de desalinhamento. As situações de desalinhamento *offset* e desalinhamento angular são apresentadas abaixo.

5.2.1. Desalinhamento Angular

Na Figura 33 encontramos um espectro característico de um desalinhamento angular. Existe um primeiro valor de pico na velocidade de rotação com um valor muito superior ao segundo, este é o espectro característico.

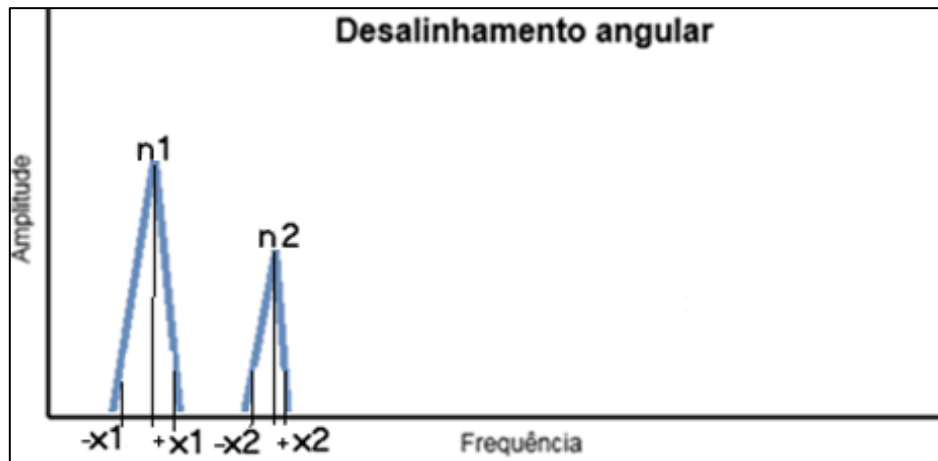


Figura 33 - Representação esquemática de FFT de um defeito de desalinhamento angular [86]

Há a necessidade de determinar os dois valores de pico e definir os intervalos a analisar. Depois de estarem definidos os valores e tendo em consideração o prévio conhecimento do equipamento e atribuído um valor para Y , é verificado o valor de RMS_p indicado na equação 12, e assim obtemos o fator de desalinhamento F_{DL} . Utilizando as equações 12 e 13, caso o valor de $RMS_{p1} > RMS_{p2}$ e $RMS_{p2} > K_1$ (K_1 = valor definido pelo utilizador). O valor de K_1 foi criado para que seja possível diferenciar o desalinhamento angular relativamente à falha por desalinhamento Offset.

5.2.2. Desalinhamento Offset

Na Figura 34 encontramos um espectro característico de um desalinhamento *offset*. Existe um segundo pico com um valor muito superior ao primeiro, que correspondente aos valores de espectro característico. É possível determinar o valor do desalinhamento utilizando a equação 11 e tendo em consideração o valor de F_{DL} .

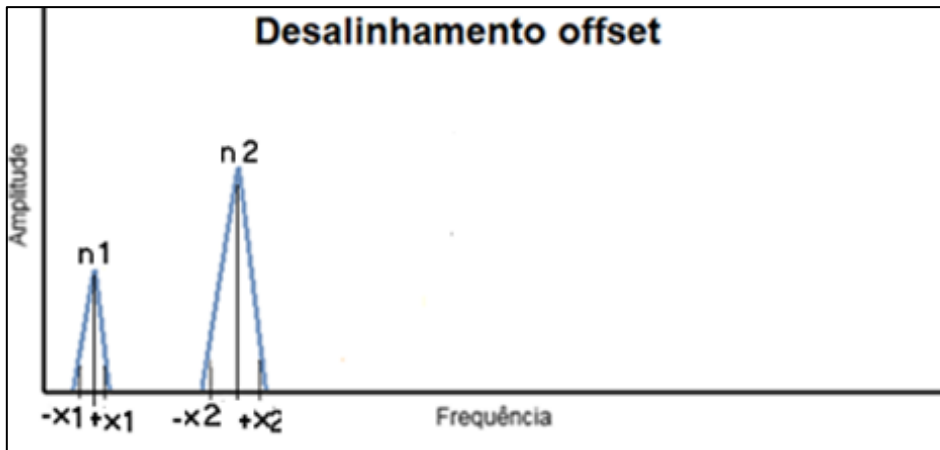


Figura 34 - Representação esquemática de FFT de um defeito de desalinhamento offset [86]

Ao contrário do desalinhamento angular, caso o valor de $RMS_{P2} > RMS_{P1}$ e $RMS_{P1} > K_2$ (K_2 =valor definido pelo utilizador). O valor de K_2 foi criado para que seja possível diferenciar o desalinhamento Offset do desalinhamento angular.

5.3 – Defeitos em engrenagens

A Figura 35 representa um espectro característico de um equipamento com falhas nas engrenagens. Consegue identificar-se o pico da frequência de engrenamento e bandas laterais, características dos defeitos.

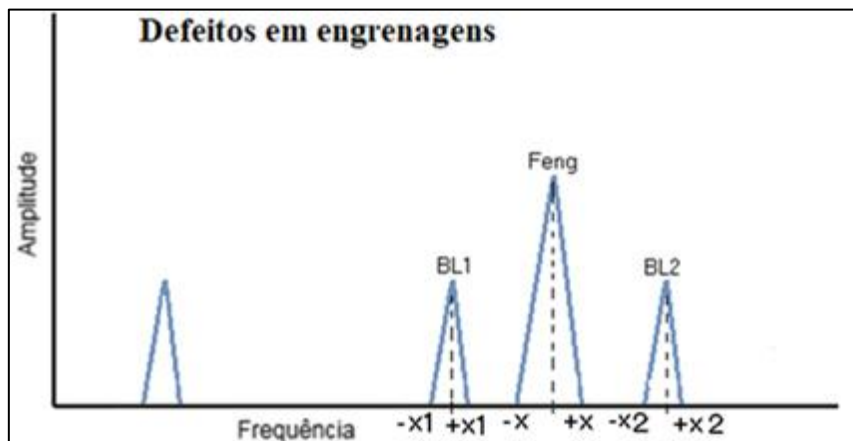


Figura 35 - Representação esquemática de FFT de um defeito nas engrenagens

$$F_{eng} = n \times Z; RMS_{eng} \begin{bmatrix} F_{eng} - x \\ F_{eng} + x \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$BL\ 1 = (n \times Z) - n \rightarrow RMS_{BL1} \left[\frac{BL1 - x1}{BL1 + x1} \right] \quad (13)$$

$$BL\ 2 = (n \times Z) + n \rightarrow RMS_{BL2} \left[\frac{BL2 - x2}{BL2 + x2} \right] \quad (14)$$

$$FT_{eng} = \frac{1 - (RMS_{eng} + RMS_{BL1} + RMS_{BL2})}{1 - RMS_{TOTAL}} \quad (15)$$

Os valores de x1 e x2 são utilizados para comportarem uma gama do valor de RMS que considera a possível variação da velocidade de rotação do veio originada pelo motor elétrico. Visto as frequências serem obtidas pela multiplicação da velocidade pelo número de dentes.

Nestas equações Z representa o número de dentes de cada engrenagem, dado indicado pelo fabricante e n a velocidade de rotação do equipamento.

Para considerarmos que existem defeitos nas engrenagens do equipamento, é necessário definir um fator A para o qual o equipamento está com defeitos nas engrenagens e encontrar uma representação esquemática de acordo com a Figura 35, em que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Se } FT_{eng} \geq A \rightarrow \text{Defeitos em engrenagens} \\ \text{Se } FT_{eng} < A \rightarrow \text{Inexistencia defeitos em engrenagens} \\ RMS_{BL1} \text{ e } RMS_{BL2} > 0 \rightarrow \text{Defeitos em engrenagens} \end{array} \right.$$

5.4 – Defeitos/desgaste em pás

Em equipamentos providos de pás, através da análise das vibrações, é possível verificar se existem defeitos ou desgastes. A Figura 36, apresenta a representação esquemática de um espectro de um equipamento com defeito.

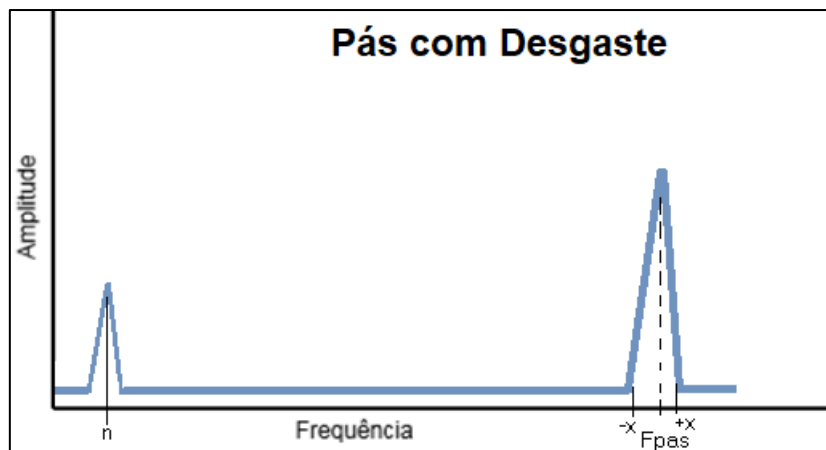


Figura 36 - Representação esquemática de FFT de um defeito/desgaste nas pás

Para determinação da frequência de engrenamento das $F_{pás}$ devemos considerar a equação 16.

$$F_{pás} = n \times n_{pás} \quad (16)$$

A velocidade de rotação do veio é representada por n e o número de pás por $n_{pás}$.

Para se avaliar a existência de defeitos nas pás do equipamento, deve ser definido um valor a partir do qual o equipamento deve ser intervencionado, a esse valor foi atribuída a variável D (D =valor definido pelo utilizador). Caso haja um histórico do equipamento, o valor D , pode eventualmente corresponder ao valor registado exatamente antes da avaria.

$$RMS_{pás} = \left[\frac{F_{pás} - x}{F_{pás} + x} \right] \quad (17)$$

$$FT_{pás} = \frac{1 - RMS_{pás}}{1 - RMS_{TOTAL}} \quad (18)$$

Considerando o valor definido para D, e caso o resultado da equação 18 seja maior ou igual a D, estamos a aproximarmo-nos da necessidade de intervenção. Neste período de funcionamento, deve haver um cuidado redobrado com o equipamento.

$$\begin{cases} \text{Se } F_{pás} \geq D \rightarrow \text{Defeitos/desgaste em pás} \\ \text{Se } F_{pás} < D \rightarrow \text{Inexistencia defeitos/desgaste nas pás} \end{cases}$$

5.5 – Análise termográfica

De acordo com a Tabela 5 e considerando a análise qualitativa, a variação do ΔT indica-nos o nível de prioridade, bem como o tipo de ação recomendada. Tendo estes dados em consideração podemos definir que a variação da temperatura corresponde à comparação das medições efetuadas nos mesmos pontos do equipamento, quando este está a funcionar em condições idênticas.

$$NP = \Delta T \ll - \gg NP = T_1 - T_2 \quad (19)$$

$$\text{Se } \Delta T \begin{cases} 1 - 3 \rightarrow NP 4 \\ 4 - 15 \rightarrow NP3 \\ > 15 \rightarrow NP1 \end{cases} \quad (20)$$

Após análise do ΔT , ficamos com indicação da prioridade e do tipo de ação recomendada.

$$NP = T_{amb} - [(T_1 * \varepsilon * T * Z) - (T_2 * \varepsilon * T * Z)] \quad (21)$$

$$\text{Se } \Delta T \begin{cases} 1 - 10 \rightarrow NP 4 \\ 11 - 20 \rightarrow NP3 \\ 21 - 40 \rightarrow NP2 \\ > 40 \rightarrow NP1 \end{cases} \quad (22)$$

De acordo com o valor de NP obtido, a ação recomendada deverá ser definida de acordo com o indicado na Tabela 5.

Foi também considerada a criação de uma abordagem automática para avaliação [87]. Para que o mesmo seja posto em prática é necessário proceder da seguinte forma:

A fotografia obtida é formada por um conjunto pontos/pixéis, sendo definido cada pixel com um valor numérico inteiro positivo com a forma de uma matriz $n \times m$, onde cada pixel $p(x, y)$, indica a intensidade de cor em cada posição (x, y) , de acordo com a Figura 37. Para a abordagem apresentada serão consideradas imagens em níveis de cinzento, e a cada pixel é atribuído um valor numérico entre 0 a 255 considerando uma escala de tonalidades. Com o exemplo da Figura 37 podemos observar diferentes níveis de cinzento com escala que varia de 47 a 213.

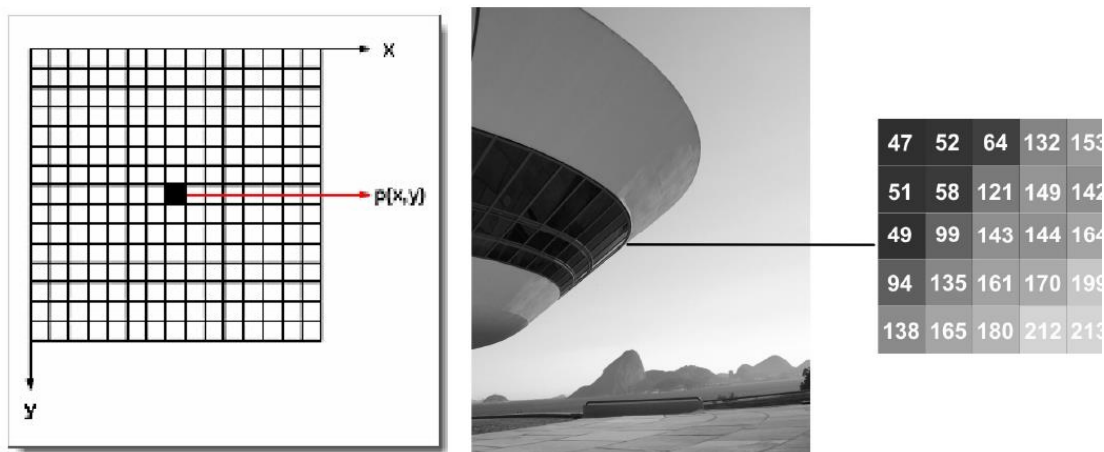


Figura 37 - Divisão da imagem em pixels [88]

Para aplicação da abordagem é necessário processar cada fotografia, obtendo-se assim o valor de cada pixel da totalidade da imagem a analisar. Proceder-se depois ao cálculo da intensidade média, e à conversão para valores de temperatura, é também possível através desta análise obter-se as seguintes informações:

- Gráficos com a evolução das temperaturas;
- Álbum com fotografias para uma análise em caso de falha inesperada;
- Informação em caso de falha;

Para obtenção do valor médio de cada pixel definimo-lo como Px_{med} , sendo este calculado pelo somatório dos valores, $C1$ (número de pixéis), de todos os n ($n=n$ linha x n coluna) pixéis da imagem, dividindo pelo total de pixéis, n . A equação 23 corresponde à fórmula de cálculo para os valores médios da intensidade dos pixéis.

$$Px_{med} = \frac{\sum_{k=1}^n (C_{1k1})}{n} \quad (23)$$

A Figura 38 exemplifica a forma de conversão dos valores de intensidade para valores de temperatura. $Px_{mín}$, Px_{int} e $Px_{máx}$ representam os valores das intensidades dos pixéis mínimos, intermédios e máximos, $T_{mín}$, T_{int} e $T_{máx}$, representam os valores das temperaturas mínimas, intermédias e máxima.

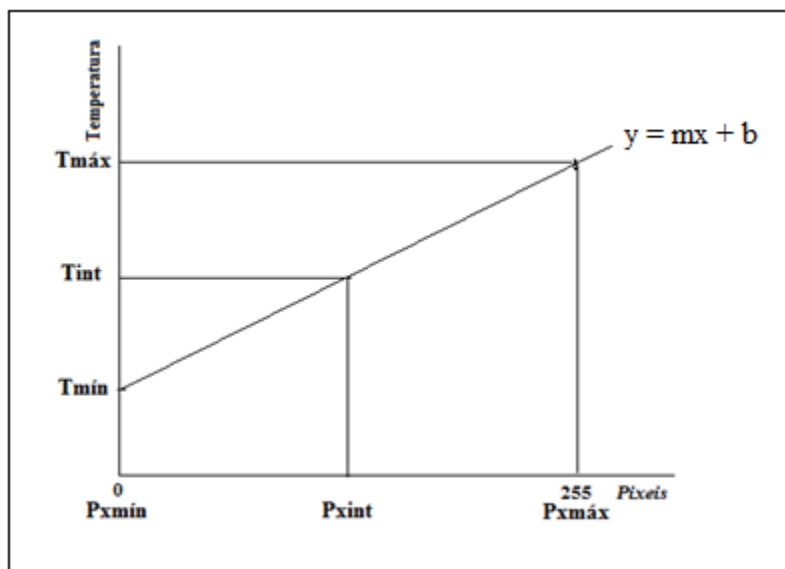


Figura 38 - Conversão de valores de pixels em valores da temperatura.

Os valores obtidos na equação 23 são representados pelos valores dos pixéis intermédios (Px_{int}) no gráfico da Figura 38. A conversão de (Px_{int}) resulta em temperatura intermédia (T_{int}). De acordo com a equação da reta do gráfico, o “y” corresponde a temperatura intermédia, “m” o declive da reta, “x” o valor de pixéis intermédios e o “b” a ordenada na origem. A partir da equação 24, obtém-se a conversão de pixéis para valores de temperatura.

$$T_{int} = m \times P_{xint} + T_{mín} \quad (24)$$

Onde

$$m = \frac{T_{máx} - T_{Mín}}{P_{máx} - P_{mín}} \quad (25)$$

O valor da temperatura intermédia é o valor apresentado no gráfico. A T_{int} é a variável de interesse para o controlo da variação térmica.

As variações bruscas de temperatura dos equipamentos são controladas. Essas variações foram consideradas como gradiente térmico e foram determinadas a partir da equação 26.

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (26)$$

onde, ΔT é variação da temperatura em graus Celsius e Δt variação do tempo em minutos.

6. Análise vibracional e termográfica

Para a realização da presente dissertação, foram seleccionados os equipamentos do sistema de AVAC do IPAMEI, o quadro eléctrico adjacente aos mesmos e os painéis solares existentes no mesmo piso:

- Duas bombas (B);
- Dois compressores (C);
- Quadro eléctrico (QE);
- Painéis Solares (P).

Estes equipamentos conforme a Figura 39, constituem o sistema de aquecimento de ar, existente no edifício principal do IAPMEI, o quadro eléctrico de controlo do mesmo, e painéis fotovoltaicos para produção de energia para alimentação do sistema.

Devido à redundância o sistema compreende dois conjuntos de dois compressores de parafuso e dois conjuntos de duas bombas centrífugas. As medições foram realizadas nos equipamentos

indicados B1, C1, QE e P. A escolha dos equipamentos B1 e C1 deveu-se ao facto de serem os que estavam em funcionamento, aquando da primeira medição realizada.

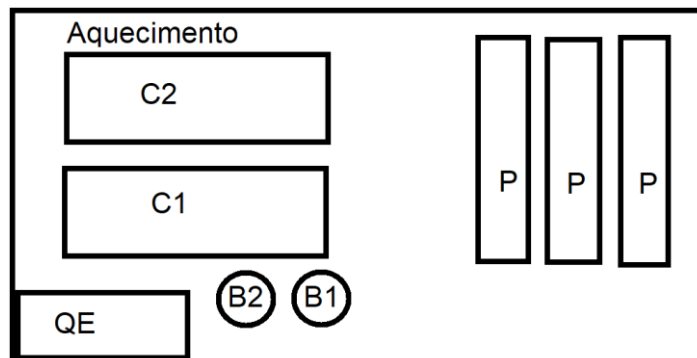


Figura 39 - Esquema da instalação existente

Para a análise do valor global de vibração dos dados recolhidos, recorreu-se à norma ISO 2372, com enfoque na tabela constante da referida norma, abaixo representada:

NÍVEL	CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS			
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
	Ate 15 KW (20 CV)	De 15 a 75 KW (20 -100 CV)	Acima de 75 KW base rígida	Acima de 75 KW base flexível
VALOR RMS DA VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO (MM/S)				
A - Bom	Até 0,71	Até 1,12	Até 1,8	Até 2,8
B - Satisfatório	0,71 a 1,8	1,12 a 2,8	1,8 a 4,5	2,8 a 7,1
C - Insatisfatório	1,8 a 4,5	2,8 a 7,1	4,5 a 11,2	7,1 a 18,0
D - Inaceitável	Acima de 4,5	Acima de 7,1	Acima de 11,2	Acima de 18,0

Tabela 6 - Avaliação segundo a Norma ISO 2372

6.1 Grupo de bombagem – Medição e análise de vibrações

6.1.1 Grupo de bombagem

Os pontos abaixo indicados Figura 40, representam o local onde foram efetuadas as medições, cada ponto foi medido na direção horizontal e vertical. Nestes pontos encontram-se os apoios do eixo do motor de acionamento do grupo de bombagem.



Figura 40 – Motor de acionamento da Bomba 2 e Bomba 1

Bomba	1ª mediação	Avaliação	2ª mediação	Avaliação
P1 Horizontal	1,121	B - Satisfatório	1,227	B - Satisfatório
P1 Vertical	1,207	B - Satisfatório	1,230	B - Satisfatório
P2 Horizontal	0,650	A - Bom	0,724	B - Satisfatório
P2 Vertical	0,756	B - Satisfatório	0,687	B - Satisfatório
P3 Horizontal	0,426	A - Bom	0,536	A - Bom
P3 Vertical	0,627	A - Bom	0,689	A - Bom
P4 Horizontal	0,832	B - Satisfatório	0,914	B - Satisfatório
P4 Vertical	1,304	B - Satisfatório	1,143	B - Satisfatório
P5 Horizontal	0,571	A - Bom	0,555	A - Bom
P5 Vertical	0,774	B - Satisfatório	0,896	B - Satisfatório
P6 Horizontal	0,633	A - Bom	0,608	A - Bom
P6 Vertical	0,504	A - Bom	0,461	A - Bom

Tabela 7 - Comparativo valor global de RMS

Através da análise da Tabela 7, onde são avaliados os valores globais de RMS, segundo a norma ISO 2372, podemos concluir que houve um ligeiro aumento do valor global de RMS mas que se encontram todos dentro dos parâmetros bom/satisfatório, tendo em consideração essa informação concluímos que não há necessidade de intervenção no equipamento.

Os pontos indicados nos espectros abaixo desde a figura 41 à figura 48 representam uma amostra da totalidade dos espectros obtidos.

O pormenor da figura 42, representada uma ampliação de pontos-chave em análise, onde é possível constatar pelo aumento do nível de vibração que houve uma ligeira degradação do ponto 1, em relação à medição representada na Figura 43, cujo pormenor se encontra na Figura 44.

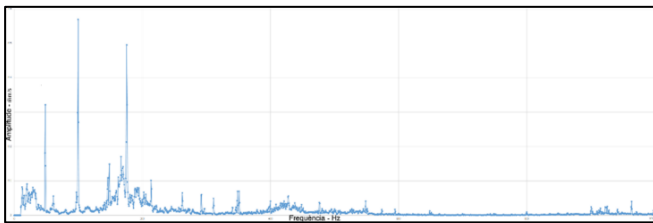


Figura 41 - 1º Medição – Horizontal

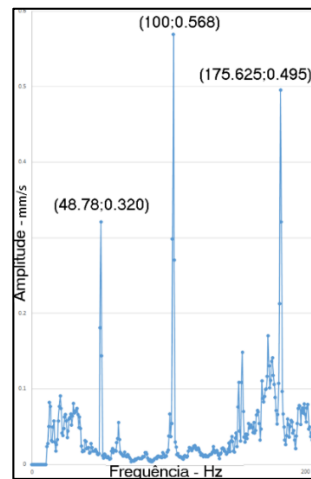


Figura 42 - Ponto 1 Pormenor



Figura 43 - 2º Medição – Horizontal

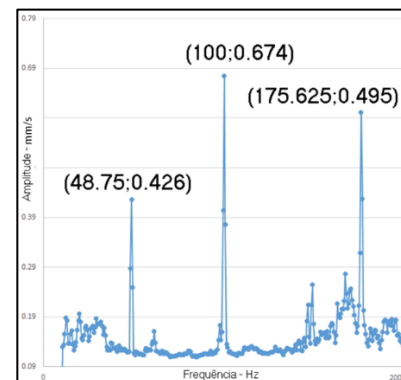


Figura 44 - Ponto 1 Pormenor



Figura 45 - 1ª Medição – Horizontal

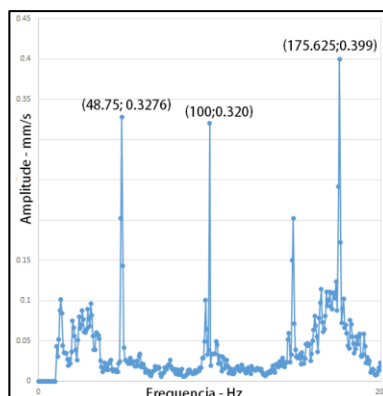


Figura 46 - Ponto 4 Pormenor

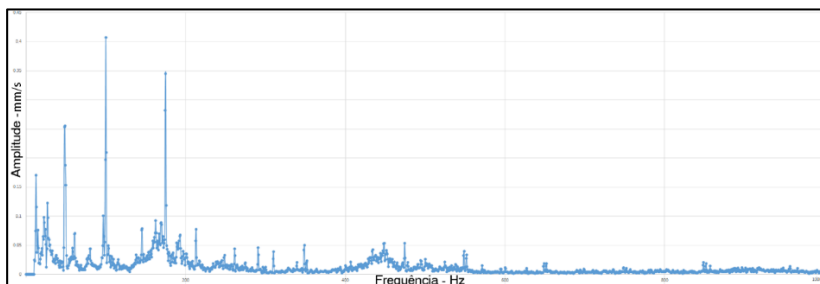


Figura 47 - 2ª Medição – Horizontal

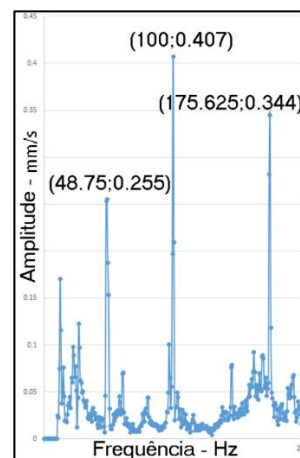


Figura 48 - Ponto 4 Pormenor

A análise da 47/48, permite identificar um ligeiro aumento do valor das vibrações. Uma vez que se tratam de valores tão próximos não existe necessidade de intervenção no equipamento.

Análise em Frequência				
Bomba	1º Medição		2ª Medição	
	Hz	mm/s	Hz	mm/S
P1 Horizontal	100	0.568	100	0.674
P1 Vertical	100	0.539	100	0.562
P2 Horizontal	100	0.468	100	0.542
P2 Vertical	48.75	0.377	48.75	0.377
P3 Horizontal	12.5	0.141	12.5	0.251
	48.75	0.128	48.75	0.238
P3 Vertical	48.75	0.551	48.75	0.619
P4 Horizontal	48.75	0.327	48.75	0.255
	100	0.320	100	0.407
P4 Vertical	48.75	0.697	100	0.500
P5 Horizontal	48.75	0.229	100	0.297
P5 Vertical	48.75	0.479	100	0.504
P6 Horizontal	48.75	0.545	100	0.054
P6 Vertical	48.75	0.145	48.75	0.447
	48.75	0.191	148.75	0.0171

Tabela 8 - Análise das frequências mais relevantes

6.1.2 Análise dos resultados

Após a análise da Tabela 8, onde estão registados os valores da 1ª harmónica da velocidade de rotação (± 50 Hz) e da 2ª harmónica (100 Hz) dos diversos espectros, como exemplo os apresentados nos pontos 1 e 4, é notória e espectável a evolução ocorrida.

Entre cada medição de todos os pontos houve oito meses de diferença, nos pontos P2 Vertical, P4 Vertical, P5 Horizontal, P6 Horizontal e P6 Vertical, houve uma ligeira descida dos valores, tal não seria espectável uma vez que com a evolução e utilização dos equipamentos os mesmos tenderiam a aumentar o nível de vibrações. Estes valores podem estar relacionados com o diferente regime de funcionamento dos equipamentos, bem como com o seu período de tempo de funcionamento.

6.2 Compressor - Medição e análise de vibrações.

6.2.1 Grupo compressor

O sistema de ar condicionado do edifício principal do IAPMEI é constituído por 4 compressores de parafuso, estes permitem que haja sempre uma redundância do sistema e que em caso de intervenção o mesmo continue a funcionar sem interrupção.

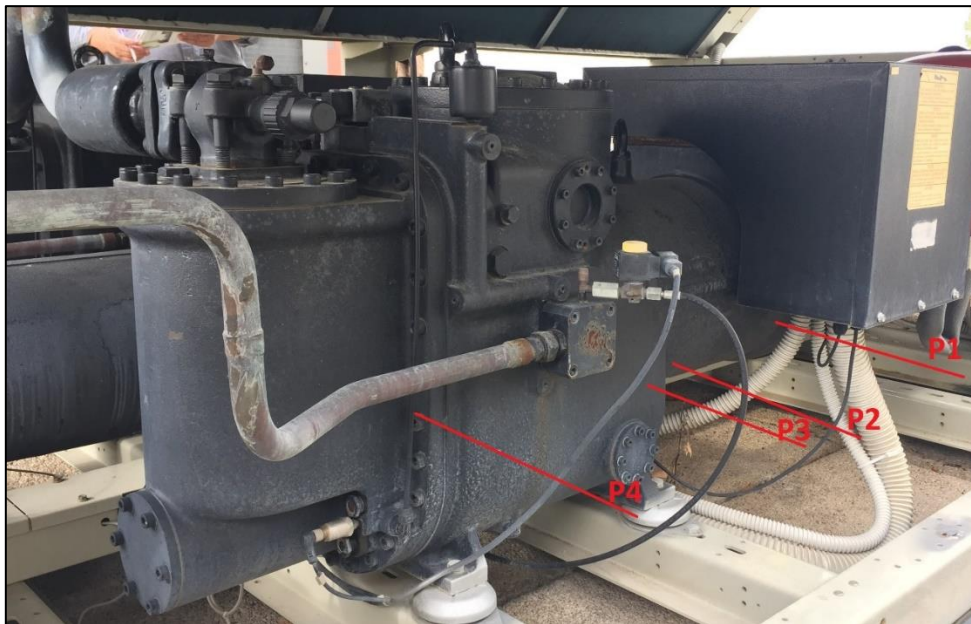


Figura 49 - Indicação do local onde houve medição de valores

Compressor C1	1ª Medição	Avaliação	2ª Medição	Avaliação
P1 Horizontal	1,371	B - Satisfatório	0,773	B - Satisfatório
P1 Vertical	1,003	B - Satisfatório	1,620	B - Satisfatório
P2 Horizontal	1,158	B - Satisfatório	0,773	B - Satisfatório
P2 Vertical	1,074	B - Satisfatório	1,067	B - Satisfatório
P3 Horizontal	1,120	B - Satisfatório	0,926	B - Satisfatório
P3 Vertical	1,126	B - Satisfatório	1,073	B - Satisfatório
P4 Horizontal	0,640	A - Bom	0,689	A - Bom
P4 Vertical	0,968	B - Satisfatório	0,658	A - Bom

Tabela 9 - Comparativo valor de overall - Compressor C1

Análise em Frequência				
Compressor Esq.	1º Medição		2ª Medição	
	Hz	mm/s	Hz	mm/s
P1 Horizontal	49.375	1.132	49.375	0.335
P1 Vertical	49.375	0.631	49.375	0.946
P2 Horizontal	49.375	0.506	49.375	0.335
	592.5	0.794	26.875	0.286
P2 Vertical	49.375	0.351	49.375	0.143
	592.5	0.888	592.5	0.002
P3 Horizontal	49.375	0.385	49.375	0.428
	593.75	0.775	594.75	0.282
P3 Vertical	49.375	0.302	49.375	0.715
	593.75	0.889	594.75	0.357
P4 Horizontal	49.375	0.071	49.375	0.062
	593.75	0.452	594.75	0.380
P4 Vertical	49.375	0.191	49.375	0.062
	594.375	0.710	594.375	0.380

Tabela 10 - Análise das frequências mais relevantes

6.2.2 Análise dos resultados

Considerando a norma já mencionada para avaliação das bombas e os valores obtidos nas duas primeiras medições apresentados na Tabela 9, situam-se ao nível do bom ou satisfatório, tornando desnecessária qualquer tipo de intervenção, tal é possível de verificar também através da comparação dos valores de frequência (Tabela 10) obtidos nos diversos pontos do compressor. Estas medições, tal como as efetuadas na bomba, foram efetuadas com 8 meses de diferença, em alguns pontos existe uma diminuição do nível de vibração, mas dentro do mesmo grau de avaliação, esta situação pode ocorrer por alguns fatores, nomeadamente o tempo de funcionamento anterior à medição, a diferença de temperatura ambiente e a sua influência na eficiência de funcionamento, entre outros.

6.3 Determinação de fatores de falhas

6.3.1. Desequilíbrio

Tendo por base a análise realizada anteriormente em sistemas semelhantes foi definido o valor de *threshold* $Y \leq 0.6$ este é o valor para a qual ficou determinado que se estaria na presença de desequilíbrio.

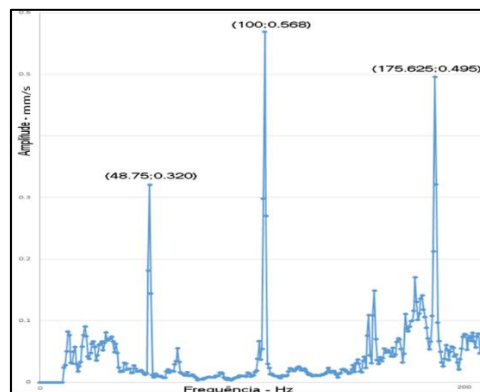


Figura 50 - Espectros ponto PIFH - existência de desequilíbrio 1ª Medição

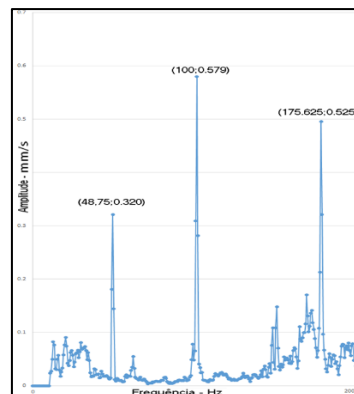


Figura 51 - Espectros ponto PIFH - existência de desequilíbrio 2ª Medição

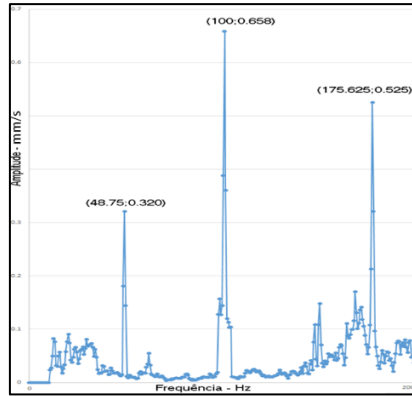


Figura 52 - Espectros ponto PIFH - existência de desequilíbrio 3ª Medição

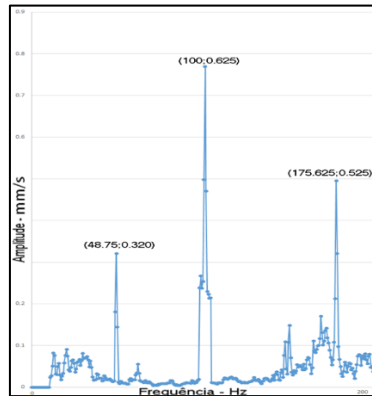


Figura 53 - Espectros ponto PIFH - existência de desequilíbrio 4ª Medição

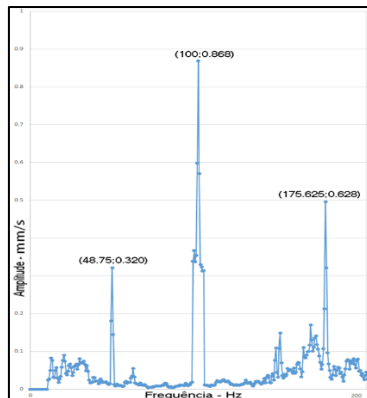


Figura 54 - Espectros ponto PIFH - existência de desequilíbrio 5ª Medição

Ponto	Medição	RMS_p	RMS_{TOTAL}	F_{DQ}
20-02-2017	1ª	0.212	0.034	0.815
26-10-2017	2ª	0.219	0.034	0.808
24-01-2018	3ª	0.276	0.037	0.751
07-03-2018	4ª	0.460	0.048	0.566
28-06-2018	5ª	0.369	0.042	0.658

Tabela 11 - Análise do FDQ

Após análise da evolução das medições efetuadas ao compressor, da e considerando a metodologia exposta no capítulo 5.1, conjugada com a análise da Tabela 11, é possível verificar o aparecimento de um desequilíbrio no equipamento. De forma a ser possível intervir nos equipamentos antes do mesmo parar por avaria, foram realizadas medições consecutivas para se seguir a evolução do processo e para se proceder à intervenção no equipamento quando o valor do fator de desequilíbrio fosse menor ou igual a 0.6.

Nas medições de dia 07-03-2018 e 28-06-2018, o valor indicava que haveria uma degradação no equipamento e que o mesmo deveria ser intervencionado. Tendo isso em consideração foi indicado à equipa de manutenção que procedesse á sua intervenção.

6.3.2. Defeitos em engrenagens

O sistema existente no IPAMEI é constituído por dois compressores de parafuso McQuay HSA, com uma velocidade de rotação de 50Hz e parafusos de 10 lóbulos. Tenho em consideração a velocidade de rotação e o número de lóbulos nos parafusos, e devido a experiência em outros sistemas semelhantes foi determinada uma frequência característica de 600 Hz.

Após análise dos espectros obtidos, foi identificado na medição P3HE, no ponto 593.75 o aparecimento de um defeito, coincidente com o aparecimento de bandas laterais a 544.37 Hz e a 643.12 Hz. Estas indiciam um defeito nas engrenagens do compressor. Procedeu-se à monitorização deste ponto e obtiveram-se os espectros constantes nas Figura 55 a Figura 59:

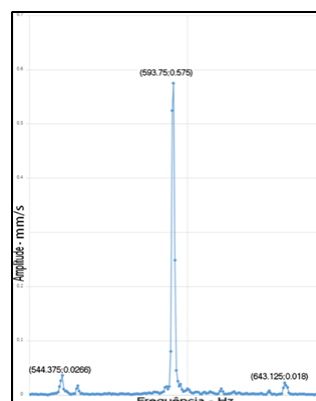


Figura 55 - Espectro P3EH - existência de falha nas engrenagens 1ª Medição

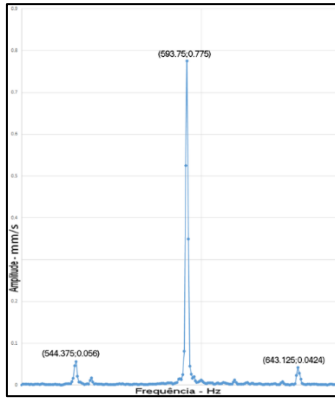


Figura 56 - Espectro P3EH - existência de falha nas engrenagens 2ª Medição

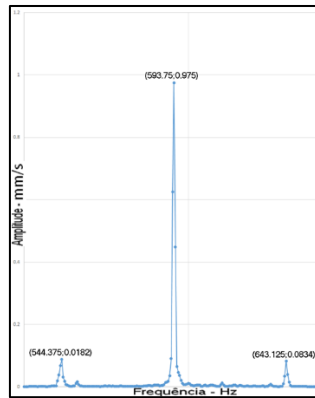


Figura 57 - Espectro P3EH - existência de falha nas engrenagens 3ª Medição

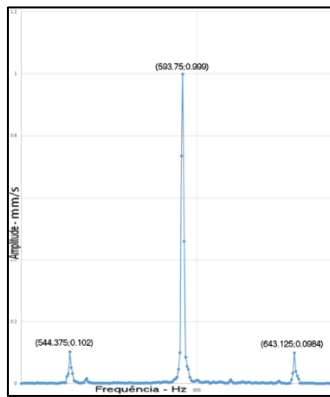


Figura 58 - - Espectro P3EH - existência de falha nas engrenagens 4ª Medição

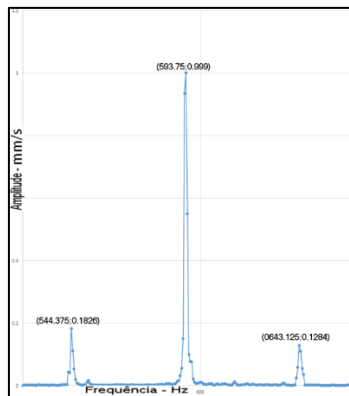


Figura 59 - Espectro P3EH - existência de falha nas engrenagens 5ª Medição

Ponto - P3HE	RMS $_{BL1}$	RMS $_{FT_{eng}}$	RMS $_{BL2}$	$F_{engTotal}$
20-02-2017	0.020	0.274	0.014	0.738
26-10-2017	0.032	0.334	0.023	0.684
24-01-2018	0.050	0.416	0.040	0.611
07-03-2018	0.051	0.444	0.047	0.584
28-06-2018	0.093	0.497	0.078	0.550

Tabela 12 - Análise da FT_{eng}

Tendo por base a análise realizada anteriormente em sistemas semelhantes foi definido que caso o valor de $FT_{engTotal} \leq 0.45$ haverá necessidade de intervenção.

Após análise dos espectros anteriormente mencionados e os valores da Tabela 12, obtidos através das equações 13, 14 e 15, é possível verificar um aumento das bandas laterais, tendo como consequência um decréscimo do valor do fator de engrenamento total. Os resultados apresentados indicam o aparecimento de uma falha neste ponto.

A fixação do fator de engrenamento total num valor inferior a 0.45 teve em consideração que a manutenção dos compressores é demorada e dispendiosa, como tal, tem de ser um valor que maximize a vida do equipamento sem comprometer o desempenho.

Na medição efetuada dia 26-06-2018 o valor era de 0.55. A equipa de manutenção foi informada que poderia haver algum desgaste excessivo nos lóbulos do equipamento, sem necessidade de intervenção imediata.

6.4 Estudo de caso aplicação da técnica de termografia

Tendo como objeto a análise do quadro elétrico instalado junto aos sistemas de aquecimento e a análise das placas fotovoltaicas, e considerado os temas abordados no capítulo 4.4, tendo como referência a análise qualitativa, da Figura 60 à Figura 65 relativas ao quadro elétrico, é possível verificar que os diversos equipamentos têm temperaturas semelhantes aos equipamentos adjacentes, com um funcionamento semelhante, logo não há necessidade de intervenção.

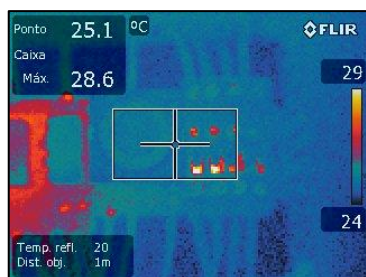


Figura 60 – Pormenor quadro elétrico

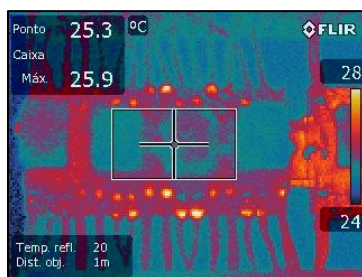


Figura 61 - Pormenor quadro elétrico

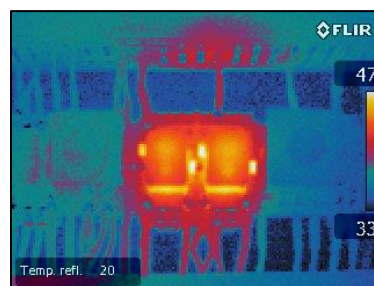


Figura 62 - Pormenor quadro elétrico

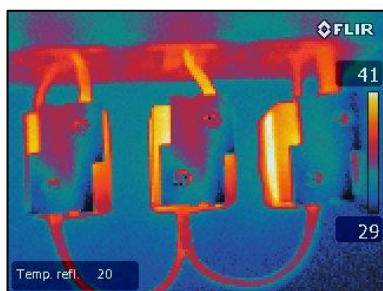


Figura 63 - Pormenor quadro elétrico

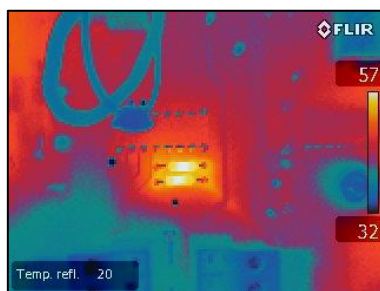


Figura 64 - Pormenor quadro elétrico

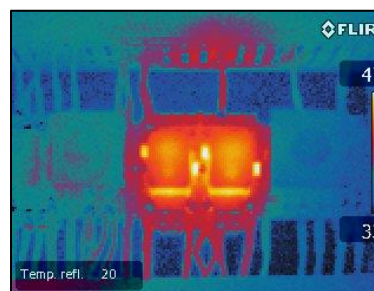


Figura 65 - Pormenor quadro elétrico

Analisando algumas imagens com mais detalhe, podemos concluir o seguinte:

- A Figura 66 apresenta uma análise dos pontos A1 e A2 e B1 e B2 utilizando uma análise qualitativa podemos verificar que os 4 pontos têm temperaturas semelhantes entre eles, podemos imediatamente concluir que as ligações estão bem feitas e a funcionar de forma adequada. Caso se opte por utilizar uma análise quantitativa, e tendo em conta que são componentes semelhantes, logo com uma emissividade, uma transmissividade e uma refletividade iguais, a conclusão será a mesma, os equipamentos estão em funcionamento normal.

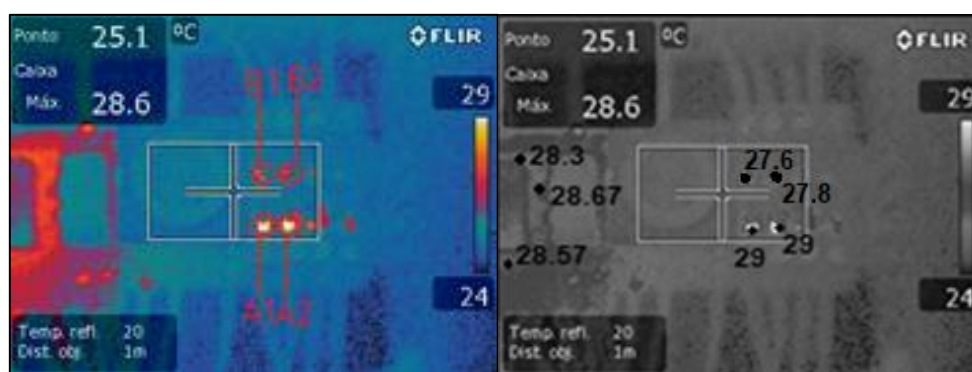


Figura 66 – Análise Termográfica

- A Figura 67, apresenta dois componentes (C1 e C2) de um quadro elétrico, ambos têm temperaturas idênticas. Tal como acima considerando a análise qualitativa podemos

afirmar que estão em bom funcionamento e não há necessidade de intervenção, utilizando a análise quantitativa o resultado seria idêntico uma vez que são componentes iguais, logo com uma emissividade, uma transmissividade e uma refletividade iguais.

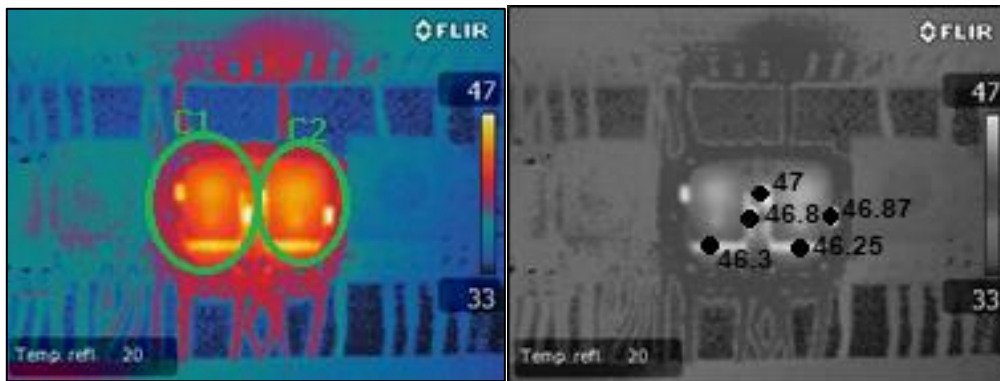


Figura 67 - Análise Termográfica

A Figura 68 representa a instalação de novos painéis solares existentes no IPAMEI.

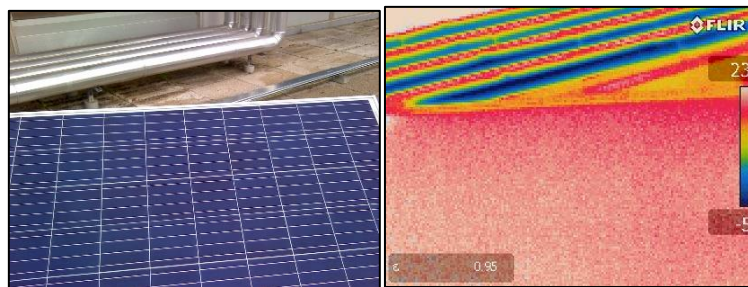


Figura 68 - Painel Solar

Sabendo que os painéis foram montados recentemente, e que a temperatura dos mesmos é totalmente uniforme, podemos indicar que não haverá qualquer problema de funcionamento. No capítulo 7.1 será indicada uma evolução à forma de obtenção de dados que permite uma maior autonomia e facilidade de tratamento dos mesmos.

7 - Conclusões

Com a presente dissertação, pretendeu-se contribuir para um maior esclarecimento sobre os benefícios da manutenção condicionada, e colocar em evidência as vantagens desta filosofia de manutenção, que maximiza a vida útil dos equipamentos/sistemas permitindo uma poupança significativa de vários recursos.

Apesar de não serem técnicas inovadoras, não têm uma aplicação muito expressiva no sector industrial. O objetivo central deste trabalho consistiu na verificação da aplicação e da análise dos resultados das mesmas e apresentação de metodologias relacionadas com estas técnicas.

Com a utilização do método inteligente desenvolvido nesta dissertação, e através da criação de um histórico obtido pela análise das medições efetuadas e aparecimento de avarias, é possível ficar com um conhecimento do equipamento monitorizado e permitir que o aparecimento de avarias/manutenção não programadas seja muito menor.

Na sequência desta abordagem foi ainda possível constatar o grande número aplicações que a manutenção condicionada pode ter.

Estes objetivos foram amplamente conseguidos pois tenho incluído a termografia e a medição de vibrações quando profissionalmente aconselho alguns clientes.

7.1 - Trabalhos Futuros

De forma a automatizar a análise termográfica a painéis fotovoltaicos, iniciou-se a procura por estudos que divulgassem essa evolução. Das diversas formas de automatização, foram escolhidas duas.

- Utilização de redes Neurais
- Utilização de sistema de obtenção das imagens e análise das mesmas.

Segundo Pavel Kuznetsov em [89], a aplicação de redes neurais, tem capacidade de aprendizagem de acordo com a evolução do sistema, permite uma automação enorme da análise termográfica.

Uma vez que nos sistemas analisados no IAPMEI existe a possibilidade de as imagens serem obtidas através de um drone, conforme a Figura 69, equipado com uma câmara termografia, a análise pode ser feita de várias formas:

1. O drone pode ter o um hardware/software que permite a análise das imagens a cada momento, os resultados podem ser depois enviados para uma unidade de controlo para interpretação dos resultados. Esta forma de análise tem a desvantagem de ser demorada, haver necessidade de imagens de mais alta definição, necessidade de um drone com enorme capacidade de computação, tornando este processo moroso e dispendioso.

2. Análise através de um dispositivo externo instalado no drone, esta forma de análise permite um aumento da velocidade de análise pois o sistema de recolha e análise são independentes. Os inconvenientes são o aumento de energia despendida para realizar ambas as funções e os problemas de transmissão dos dados.
3. O drone será usado exclusivamente para transmissão das imagens, toda a análise é feita remotamente. Continua a haver o problema de transmissão das imagens, mas permite drones mais simples, mais baratos, a análise é depois realizada num computador comum. Esta solução é ainda mais fácil de personalizar e de adaptar a cada situação, uma vez que o sistema de análise é desenvolvido segundo as necessidades do utilizador. Existem atualmente disponíveis diversos softwares já desenvolvidos para a análise das imagens obtidas

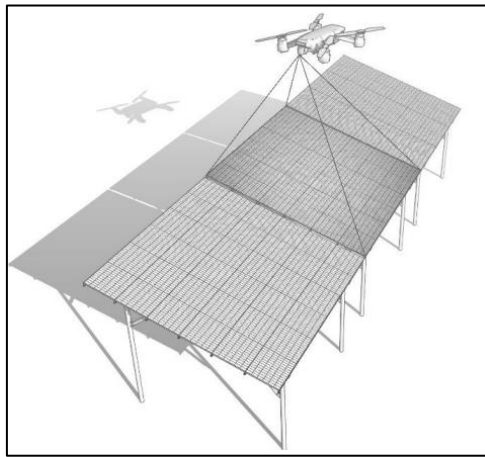


Figura 69 - Exemplo de drone de captação de imagens termográficas [89]

Tento em consideração os sistemas analisados e existentes no IPAMEI, a solução de utilização do drone pode ser uma grande mais valia. O drone partilhará a informação para um software de análise.

Utilizando o Octave/Matlab, o método mais utilizado [90] é a da criação de limites, ou seja, o método de Otsu, que funciona da seguinte forma:

1. Selecionar os limites, mínimo e máximo das intensidades térmicas da imagem
2. Calcular o valor médio das intensidades μ_1 e μ_2
3. Selecionar um novo limite

$$T = 1/2(\mu_1 + \mu_2) \quad (27)$$

4. O Erro Quadrático Médio (MSE) é a função de referência utilizada para se obter o valor da Intensidade Quadrada Média (ASI) em relação sinal - ruído de pico (PSNR) depende do valor do MSE. As fórmulas para MSE e PSNR são as abaixo indicadas:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M (x(i,j) - y(i,j))^2 \quad (28)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \quad (29)$$

Em que $x(i,j)$ representa a região térmica original, $y(i,j)$ representa a imagem térmica linear, M é altura da imagem e N a largura

5. Fazer a seleção do ROI (local de interesse de análise)
6. Fazer uma análise discriminatória para transformação da imagem numa matriz 2D
7. Obtenção dos resultados/pontos de interesse
8. Análise dos resultados obtidos.

Com a utilização do drone/rede neuronal, e a utilização de um software capaz de receber as imagens e fazer a análise tornávamos o processo muito mais simples, e autónomo.

8 - Bibliografia

- [1] P. D. J. Dias, *Optimização de Planos de Manutenção e de Manutibilidade de Equipamentos numa Indústria de Pasta de Papel*, Instituto Politécnico de Coimbra Instituto Superior de Engenharia, 2010.
- [2] P. A. d. S. Silva, *Manutenção Condicionada baseada na análise de vibrações*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.
- [3] C. Sequeira, *A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores*, Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [4] M. S. M. S. P. P. P. A. Ghoshal, "Structural health monitoring techniques for wind turbine blades.," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, pp. 309-328, 2000.
- [5] T. V. E. C. C. D. W. Weijtjens, *Vibration based structural health monitoring of the substructures of five offshore wind turbines*, Procedia Engineering, 2017.
- [6] J.-H. Y. J.-T. K. J.-H. P. W. Ki., *Vibration based Structural Health Assessment of a Wind Turbine Tower Using a Wind Turbine Model*, Procedia Engineering, 2017.
- [7] F. C. K. G. C. T. A.E. Aktan, "Issues in infrastructure health monitoring for management," *Journal of Engineering Mechanics*, pp. 711-724, 2000.
- [8] D. F. A. H. D. B. V. H. K.-L. L. A. L. A. A.E. Aktan, "Structural identification for condition assessment: experimental arts," *Journal of Structural Engineering*, pp. 1674-1684, 1997.
- [9] A. A. H. Alaylioglu, "Finite element and experimental bases of a practical bridge management and maintenance system," *Computers and Structures*, pp. 281-293, 1999.
- [10] A. A. F.N. Catbas, "Condition and damage assessment: issues and some promising indices," *Journal of Structural Engineering*, pp. 1026-1036, 2002.
- [11] L. M. P. L. Fryba, "Load tests and modal analysis of bridges," *Engineering Structures*, pp. 102-109, 2001.
- [12] H. S. C. F. M.L. Fugate, "Unsupervised learning methods for vibration-based damage detection.," em *Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference.*, San Antonio, Texas, USA, 2000.
- [13] I. E. M. B. F.A. Andrade, "A New Approach to Time-Domain Vibration Condition Monitoring: Gear Detection and Identification by The Kolmogorov-Smirnov Test," *Journal of Sound and Vibration* , pp. 909-919, 2001.
- [14] M. C. C. D.J. Pedregal, "State Space Models for Condition Monitoring: a case study.," *Reliability Engineering & System Safety*, pp. 171-180, 2005.
- [15] V. M. A. J. Y. Zhan, "Adaptative Model for Vibration Monitoring of Rotating Machinery subject to random deterioration.," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, pp. 351-375, 2003.
- [16] Z. P. S. Ebersbach, "Expert system development for vibration analysis in machine condition monitoring. Expert Systems with Applications," pp. 291-299, 2006.
- [17] D. L. D. B. A. K. S. Jardine, "A review on Machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2005, pp. 1483-1510.

- [18] R. P. V. M. V. Vitor Lobo, Detecção e identificação de avarias em motores rotativos usando sensores de baixo custo, Setúbal: Joclad, 2008.
- [19] M. S. M. S. P. P. P. A. Ghoshal, “Structural health monitoring techniques for wind turbine blades,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 309-324, 2000.
- [20] T. V. E. C. C. D. W. Weijtjens, “Vibration based structural health monitoring of the substructures of five offshore wind turbines five offshore wind turbines,” *Procedia Engineering*, pp. 2294-2299, 2017.
- [21] J.-H. Y. J.-T. K. J.-H. P. W.Ki., “Vibration based Structural Health Assessment of a Wind Turbine Tower Using a Wind Turbine Model,” *Procedia Engineering*, pp. 333-339, 2017.
- [22] A. K. L. W. M. Martinez-Luengo, “Structural health monitoring of offshore wind turbines: A review through the Statistical Pattern Recognition Paradigm Renewable and Sustainable Energy Reviews,” pp. 91-105, 2016.
- [23] B. K. P. N. Z. D. L. Krstulovic-Opara, “Thermal imaging and Thermoelastic Stress Analysis of impact damage of composite materials,” 2011, pp. 713-719.
- [24] D. W. G. B. J. Rantala, “Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites,” 1996, pp. 215-228.
- [25] A. Dutton, Thermoelastic Stress Measurement and Acoustic Emission Monitoring in Wind., London: European wind energy conference 204, 2004.
- [26] C. K. R. P. A. D. J. K. C. K. F. Hahn, “Design, fatigue test and NDE of a sectional wind turbine rotor blade,” 2002, pp. 267-277.
- [27] M. A. E. T. U. N. G. Walle, Defect indications in sono-thermography in relation to defect location and structure, Belgium: Proceedings of quantitative infrared thermography conference, 2004, p. 2004.
- [28] M. K. M. F. Lizak, Improving reliability and decreasing losses of electrical systems with infrared thermography., Eslováquia: Universidade Técnica de Kosice, 2008.
- [29] R. L. J. Martínez, “Experience performing infrared thermography in the maintenance of a distribution utility.,” em *International Conference on Electricity Distribution*, Viena, Áustria, 2007.
- [30] J. H. O. S. A. Rahmani, “Intelligent fault detection of electrical equipment in ground substations using thermo vision technique,” em *International Conference on Mechanical and Electronics Engineering*, Tóquio, Japão., 2010.
- [31] J. J. Snell, “Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines,” em *International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*, Montreal, Canadá, 2000.
- [32] S. T. M. S. Jadin, Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using thermography, Pahang, Malásia,: Faculdade de Electricidade e Engenharia Electrónica., 2012.
- [33] L. Y. Y.C. Chieh, “Automatic diagnostic system of electrical equipment using infrared thermography.,” em *International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition*, Malaca, Malásia, 2009.
- [34] D. T. Z. Azmat, “Infrared thermography and its role in rural utility environment.,” em *Proceedings of the Rural Electric Power Conference*, San Antonio, EUA, 2005.

- [35] J. A. M. Silva, *Gestão da Manutenção de Edifícios - Análise de processos e especificação do sistema de suporte*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [36] C. V. Pinto, *Organização e Gestão da Manutenção*, Monitor.
- [37] J. S. Cabral, *Organização e Gestão da Manutenção*, Lidel.
- [38] F. Monchy, *La fonction maintenance*, Paris: Masson, 1996.
- [39] M. Brito, *Manutenção - Manual Pedagógico PRONACI*, AEP: PRONACI Manutenção,, 2003.
- [40] “blog.arkmeds.com,” [Online]. Available: <https://blog.arkmeds.com/2021/12/02/manutencao/>. [Acedido em 23 4 2023].
- [41] E. C. f. Standardization., *EN 13306 Maintenance – Maintenance Terminology.*, Brussels: European Committee for Standardization., 2001.
- [42] J. C. M. Rato, *Gestão da Manutenção da Frota das UQE-S2300*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [43] J. P. S. Cabral, *Gestão da Manutenção de Equipamentos, Instalações e Edifícios*, Lisboa: Lidel – Edições Técnicas, 2009.
- [44] [Online]. Available: <http://inter-irc.wikidot.com/manutencao-preventiva-sistemica>. [Acedido em 10 Fevereiro 2015].
- [45] C. R. C. L. Wilson Roberto Marcorin, “Análise dos Custos de Manutenção e de Não-manutenção de Equipamentos Produtivos.,” *Revista de Ciência & Tecnologia*, 2003, pp. 35-42.
- [46] J. N. Alan Kardec Pinto, *Manutenção - Função Estratégica*, Q. Editora, 2010.
- [47] L. Ferreira, *Uma Introdução à Manutenção*, Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 1998.
- [48] N. (. A. a. S. A. 2. R. Centered. [Online]. Available: <http://www.hq.nasa.gov/office/codej/codejx/Assets/Docs/NASARCMGuide.pdf>. [Acedido em 19 January 2018].
- [49] D. J. W. e. L. R. H. Keith Mobley, *Maintenance Engineering Handbook*, McGraw-Hill Education, 2008.
- [50] R. K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [51] W. R. M. e. C. R. Lima, *Análise dos Custos de Manutenção e de Não-manutenção de Equipamentos Produtivos*, 2013.
- [52] L. A. Ferreira, *Uma Introdução à Manutenção*, 1998.
- [53] M. J. M. F. d. Santos, *Gestão de Manutenção do Equipamento - Relatório do Projecto Final*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, 2009.
- [54] A. K. M. P. Jayaswal, *Machine Fault Signature Analysis*, *International Journal of Rotating Machiner*, 2008.
- [55] M. Carnero, “A case study. Decision Support Systems,” em *Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program*, 2003, pp. 539-555.
- [56] V. L. Valter Martins Vairinhos, “MECPAB- Um projecto de monitorização do estado de condição e predicção de avarias de bordo.,” em *X Jornadas de Construção Naval, IST.*, Lisboa, 2006.

- [57] C. M. H. Allan G Piersol, Harris' Shock and Vibration Handbook,, McGraw-Hill Handbooks, 2002.
- [58] P. G. Cornelius Scheffer, Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance, Elsevier, 2004.
- [59] D. A. G. d. Costa, Técnicas Avançadas de Análise de Vibração no âmbito do Controlo de Condição, Trabalho Final de Mestrado em Engenharia Mecânica, Lisboa: ISEL, 2017.
- [60] J. K. Sinha, Vibration Analysis, Instruments, and Signal Processing, CRC Press, 2015.
- [61] R. M. R. Parreira, Análise de dados de vibração - Contributo para a definição do estado de condição, Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação - Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [62] D. M. Marques, “Análise Espectral com Wavelets do ECoG em Crises Epilépticas,” em *Faculdade de Ciências e Tecnologias*, Lisboa, 2012.
- [63] Vibration Training Quick Reference, Mobius Institute.
- [64] M. Pacholok, Uso da termografia para avaliação dos desalinhamentos de Eixos em Máquinas Rotativas, Curitiba, 2004.
- [65] F. r. Spamer, Tecnicas Preditivas de Manutenção de Máquinas Rotativas, 2009.
- [66] G. d. A. Guilherme Bandeira e R. Gianelli, VIBRAÇÃO E RUIDO EM MANUTENÇÃO PREDITIVA, Bauru: Universidade Estadual “Julio de Mesquita Filho” Faculdade de Engenharia - Campus de Bauru, 2010.
- [67] [Online]. Available: <https://slideplayer.com.br/slide/1590523/>. [Acedido em 21 01 2021].
- [68] O. R. C. Filho, Aplicações termográficas na manutenção.
- [69] T. K. M. F. R. A. S. F. M. R., Ensaio não destrutíveis termografia, 2009.
- [70] R. e. A. Termografia. [Online]. Available: <http://www.scribd.com/doc/38190339/TERMOGRAFIA>. [Acedido em 10 Maio 2015].
- [71] M. I. C. termográficas. [Online]. Available: <http://www.mra.pt/industria/produtos/termografia-e-camaras-de-visao-termica/camaras-termograficas-manutencao/>. [Acedido em 15 Maio 2015].
- [72] “<https://romutech.com.br/>,” [Online]. Available: <https://romutech.com.br/termografia-uma-visao-geral/>. [Acedido em 5 4 2019].
- [73] M. M. d. A. P. S. C. Luís Viegas Mendonça, A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios.
- [74] Manual de Utilizador Flir.
- [75] “Espectro eletromagnético,” [Online]. Available: <https://www.hisour.com/pt/electromagnetic-spectrum-23812/>. [Acedido em 1 09 2019].
- [76] D. P. D. T. L. B. A. S. L. Frank P. Incropera, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wily & Sons, Inc., 1996.
- [77] E. S. B. M. Barreira, Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios. Dissertação de Mestrado., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- [78] “UNIVERSAL MEDICAL IMAGING GROUP,” [Online]. Available: <http://universalmedicalimaging.com/preparation.html>. [Acedido em 18 9 2019].

- [79] “Infrared Imaging Services,” [Online]. Available: <https://www.infraredimagingervices.com/electrical-infrared/>. [Acedido em 18 9 2019].
- [80] “Irtc Infrared Thermal Consultants,” [Online]. Available: <https://www.cylex.net.za/company/irtc-infrared-thermal-consultants-17859569.html>. [Acedido em 18 9 2019].
- [81] M. J. d. L. M. F. P. Luiz Alberto Ferreira Rangel, Utilização da termografia na manutenção preditiva.
- [82] J. R. J. J. Snell, “Improving results of thermographic inspections of electrical transmission and distribution lines.,” em *International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*,.
- [83] T. M. D. Oliveira, Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com recurso a termografia, Porto: FEUP, 2012.
- [84] M. Ahmad, TERMOGRAFIA COMO INSTRUMENTO DE MANUTENÇÃO CONDICIONADA NA MARINHA, Escola Naval, 2014.
- [85] I. Institute, “standard for infrared inspection of electrical systems & rotating equipment,” Burlington, Institute, Infrasppection, 2016, p. 19.
- [86] B. E. F. B. Morais, Análise de vibrações a grupos de eletrobombas de uma estação elevatória, Lisboa: FCT - Universidade Nova de Lisboa, 2016.
- [87] J. d. N. Branco, Diagnóstico Automático e à Distância, de Falhas em Equipamentos Marítimos, utilizando a Termografia, Oeiras: ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE, 2018.
- [88] A. Conci, “Importância do histograma em Analise de Imagens,” em *Análise de Imagens*, 25, p. 138.
- [89] P. Kuznetsov, Method for the Automated Inspection of the Surfaces of Photovoltaic Modules, Sevastopol, 2022.
- [90] M. Haider, Fault Identification in Electrical Equipment using Thermal Image Processing, Galgotias University, 2018.
- [91] V. Piedade, Manutenção Centrada na Fiabilidade, IPS - Instituto Politecnico de Setubal, 2012.
- [92] [Online]. Available: <http://inter-irc.wikidot.com/manutencao-preventiva-condicionada>. [Acedido em 10 Fevereiro 2015].
- [93] T. M. A. Gonçalves, Análise de sistemas de energia e máquinas elétricas com recurso a termografia, Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, 2011.
- [94] J. G. L. d. Abreu, João GoMelhoria nos processos de negócio para gestão da manutenção na organização Ana,sa aeroportos de Portugal procedimento de gestão da manutenção, Universidade do Algarve - Faculdade de Economia, 2011.
- [95] M. C. Morais, “Fiabilidade e Controlo de Qualidade,” Secção de Estatística e Aplicações - Instituto Superior Técnico , Lisboa, 2007.
- [96] nadabd, cacsh, csn, 2019.
- [97] P. D. J. Dias, Optimização de Planos de Manutenção e de Manutibilidade de Equipamentos numa Indústria de Pasta de Papel, Instituto Politécnico de Coimbra - Instituto Superior de Engenharia, 2010.
- [98] I. 13380, “Condition monitoring and diagnostics of machine. General guidelines,” ISO, 2002.

- [99] R. M. R. Parreira, Análise de dados de vibração: contributo para a definição do estado de condição., Dissertação de mestrado em Estatística e Gestão de Informação, Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [100] V. H. a. PSS.Srinivasan, Vibration analysis of parallel misaligned shaft with ball bearing system, Perundurai - India: Department of Mechanical Engineering - Kongu Engineering College, 2009.