



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamento de Engenharia Mecânica



Análise por Ultra-sons no Controlo de Condição

ARMANDO SILVEIRA

(Licenciado em Engenharia do Ambiente e Território)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Mestre António Afonso Roque
Mestre Tiago Alexandre Narciso da Silva

Júri:

Presidente: Doutor Rui Pedro Chedas Sampaio
Vogais: Doutora Cláudia Dias Sequeira
Mestre António Afonso Roque

Janeiro de 2015



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamento de Engenharia Mecânica

Análise por Ultra-sons no Controlo de Condição

ARMANDO SILVEIRA

(Licenciado em Engenharia do Ambiente e Território)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Mestre António Afonso Roque
Mestre Tiago Alexandre Narciso da Silva

Júri:

Presidente: Doutor Rui Pedro Chedas Sampaio
Vogais: Doutora Cláudia Dias Sequeira
Mestre António Afonso Roque

Janeiro de 2015

*Ao meu filho Santiago
e à minha esposa Liliana*

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação representa o final de mais uma etapa da minha vida. Uma etapa cuja travessia nem sempre se mostrou fácil e cujo sucesso em muito se deve à ajuda de algumas pessoas. Por esse motivo, quero expressar-lhes o meu profundo agradecimento.

Começo por agradecer aos meus orientadores Mestre António Roque e Mestre Tiago Silva que desde o primeiro dia se mostraram receptivos em assumir o compromisso da orientação desta dissertação. Por toda a ajuda, transmissão de conhecimentos, disponibilidade e incentivo o meu muito obrigado.

Agradeço também à empresa DatAnálise – Serviços e Técnicas de Manutenção, Lda., e em muito especial ao Sr. José Veiga, Sr. José Dominguez e ao Nuno Pereira, por me terem recebido, ajudado e acompanhado na realização dos ensaios quer nas instalações industriais quer na bancada experimental da DatAnálise.

Agradeço também aos que comigo trabalham, nomeadamente ao Eng.º Conde Santos, por todo o seu apoio e por me ter dado sempre a flexibilidade horária que me permitiu conseguir conciliar o emprego com o mestrado.

Quero agradecer também a todos os meus amigos, por todo o seu companheirismo e amizade sempre demonstrada.

Por fim o mais profundo agradecimento aos meus Pais e Irmãos, e em muito especial à minha Esposa e Filho pelo apoio incondicional e compreensão que sempre me deram, e que sem eles tudo teria sido mais difícil.

A todos, o meu Obrigado!

RESUMO

No âmbito da manutenção condicionada de equipamentos, o presente trabalho procura aprofundar a técnica da análise de ultra-sons no controlo de condição, como sendo um ensaio não destrutivo, repleto de vantagens e tão pouco usado em Portugal, ao invés da análise de vibrações (amplamente mais utilizado e divulgado). Pretende-se também comparar os ultra-sons com a análise de vibrações

A aplicação das técnicas de ultra-sons possui uma enorme relevância como parte integrante de um programa de manutenção condicionada de qualquer instalação industrial, revelando-se por isso interessante estudar o seu potencial na análise da condição dos equipamentos.

Procura-se ainda com este trabalho seleccionar e pôr em evidência informação importante relacionada com esta área, e também demonstrar a possibilidade de usar esta técnica como uma forma mais rápida, fácil e intuitiva de verificar o estado da condição de um determinado rolamento.

A avaliação da condição do equipamento bem como o estudo da tendência da sua degradação, é conseguida aplicando os ultra-sons, através dos quais se detectam variações no valor médio do nível sonoro ou nos espectros de frequência e sinal no tempo, resultante do seu funcionamento. Em função dessa análise são estabelecidas regras para as intervenções de manutenção, tendo sempre em atenção o objectivo de maximizar a detecção das potenciais avarias (evitando paragens não programadas) e a minimização de intervenções desnecessárias.

Através da exploração e implementação da técnica de ultra-sons na manutenção condicionada, tenciona-se aumentar a eficiência dos equipamentos, diminuindo assim o número e tempo de paragem, diminuir os custos de manutenção e colocar a manutenção no centro do processo produtivo.

Palavras-Chave: Ultra-sons, Manutenção condicionada, Controlo de condição, Sistema integrado de manutenção, Diagnóstico de avarias, Ensaio não destrutivo (END).

ABSTRACT

Related to the condition monitoring maintenance philosophy, this work seeks to combine and deepen the analysis technique of ultra-sound as a non-destructive testing method to be used in condition-based maintenance of equipment, which is full of advantages and a little used in Portugal, where the analysis of vibration is the common practice (most known and widely used). A comparison between these two techniques is also made.

The use of ultra-sound techniques is of great relevance if being part of any industry's condition monitoring Program. For that, it proves to be interesting to study its potential in analysing the condition of the equipment.

With this work, it is also pursued to select and highlight important information related to these matters, and also demonstrate the advantages in using the ultra-sound technique as a fast, easy and intuitive way to check the status of the condition of a particular bearing.

The ultra-sound technique is here used to evaluate the condition of equipment as well as to study its degradation tendency. By analysing readings and results one can detect variations in the mean sound pressure level or in the frequency spectrums (FFT) resulting from the equipment's operation. Given this analysis, rules for maintenance interventions are established, being the objectives: maximize the detection of potential failures (avoiding unscheduled stops) and minimize the unnecessary interventions.

By exploring and correctly implementing the ultra-sound technique in condition monitoring, it is expected an increase in equipment efficiency and thereby a reduction of downtimes (in the number and time), helping in this way to get maintenance within the productive process.

Keywords: Ultrasound; Predictive maintenance, Condition monitoring, Integrated maintenance management system, Fault diagnosis, Nondestructive testing (NDT).

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

θ - Ângulo de contacto

CM - Condition Monitoring

d - Diâmetro da esfera ou rolo

De - Diâmetro da pista externa

Di - Diâmetro da pista interna

Dp - Diâmetro primitivo

END - Ensaio Não Destrutivo

FDS - Fault detection system

BSF - Frequência de defeito na esfera ou rolo

FTF - Frequência de defeito na gaiola

BPFO - Frequência de defeito na pista exterior

BPFI - Frequência de defeito na pista interior

$f_{i,g,e,r}$ - Frequência de rotação da pista interna, gaiola, externa e rolo ou esfera

BS - Frequência de Rotação das Esferas

ISQ – Instituto da Soldadura e Qualidade

N - Numero de esferas ou rolos

RMS - Root mean square

RPM - Rotações por minuto

CMS - Sistema de controlo de condição

FFT - Transformada rápida de Fourier

$\omega_{i,g,e,r}$ - Velocidade angular da pista interna, gaiola, externa e rolo ou esfera

$\omega_{i,g,e,r}$ - Velocidade angular pista interna, gaiola, externa e rolo ou esfera

$V_{i,g,e,r}$ - Velocidade linear da pista interna, gaiola, externa e rolo ou esfera

ÍNDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 | Enquadramento da Dissertação..... | 1 |
| 1.2 | Objectivos da Dissertação..... | 2 |
| 1.3 | Metodologia..... | 3 |
| 1.4 | Estrutura da Dissertação..... | 3 |
| 2. | MANUTENÇÃO INDUSTRIAL..... | 5 |
| 2.1 | Introdução..... | 5 |
| 2.2 | Evolução histórica do conceito de Manutenção..... | 6 |
| 2.3 | Manutenção Industrial..... | 7 |
| 2.4 | Estratégias de Manutenção..... | 8 |
| 2.4.1 | Manutenção Correctiva..... | 9 |
| 2.4.2 | Manutenção Preventiva Sistemática..... | 10 |
| 2.4.3 | Manutenção Preventiva Condicionada..... | 11 |
| 2.4.4 | Manutenção por Oportunidade..... | 12 |
| 3. | CONTROLO DE CONDIÇÃO..... | 14 |
| 3.1 | Introdução..... | 14 |
| 3.2 | Objectivos e Conceitos Fundamentais..... | 15 |
| 3.3 | Controlo de Condição..... | 18 |
| 3.4 | Técnicas de Controlo de Condição..... | 19 |
| 3.4.1 | Inspecção Visual..... | 20 |
| 3.4.2 | Ultra-sons..... | 20 |
| 3.4.3 | Termografia..... | 21 |
| 3.4.4 | Análise dos parâmetros de desempenho..... | 22 |
| 3.4.5 | Líquidos penetrantes..... | 22 |
| 3.4.6 | Análise de Fluidos..... | 23 |
| 3.4.7 | Análise de vibrações..... | 24 |
| 3.5 | Vantagens obtidas com um programa de Controlo de Condição..... | 25 |
| 3.6 | Desafios do Controlo de Condição..... | 26 |
| 4. | ANÁLISE DE VIBRAÇÕES..... | 27 |
| 4.1 | Introdução..... | 27 |
| 4.2 | Conceitos básicos sobre vibrações..... | 27 |
| 4.3 | Tipos de vibrações..... | 31 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.4 | Técnicas de análise de vibrações | 32 |
| 4.4.1 | Monitorização do nível global de vibração | 32 |
| 4.4.2 | Análise espectral..... | 32 |
| 4.4.3 | Amplitude da vibração em análise envelope | 32 |
| 4.4.4 | Equipamentos de medida..... | 33 |
| 4.4.5 | Detecção de defeitos em rolamentos | 39 |
| 5. | ULTRA-SONS PROPAGADOS NO AR E ESTRUTURAS | 46 |
| 5.1 | Introdução | 46 |
| 5.1.1 | Qualidade em inspecções de ultra-sons | 47 |
| 5.1.2 | Procedimento de inspecção | 48 |
| 5.1.3 | Qualificação e certificação de técnicos | 48 |
| 5.1.4 | Aplicações da tecnologia de ultra-sons | 48 |
| 5.2 | Inspecções de fugas | 49 |
| 5.2.1 | Turbulência..... | 50 |
| 5.2.2 | Forma do orifício | 51 |
| 5.2.3 | Diferenças de pressão | 52 |
| 5.2.4 | Viscosidade do fluido | 52 |
| 5.2.5 | Distância da Fuga | 53 |
| 5.2.6 | Acessibilidade da Fuga..... | 53 |
| 5.3 | Técnica para detecção de fugas | 53 |
| 5.3.1 | Ajuste da frequência (20kHz-100kHz)..... | 54 |
| 5.3.2 | Acessórios apropriados para detecção de fugas | 54 |
| 5.3.3 | Seleção do módulo adequado | 56 |
| 5.3.4 | Ensaio de pressão e vazio | 57 |
| 5.3.5 | Utilização do gerador de ultra-sons para realização de inspecções..... | 58 |
| 5.3.6 | Ajuste da Sensibilidade | 58 |
| 5.3.7 | Dificuldades em identificar múltiplas origens de ultra-sons | 59 |
| 5.3.8 | Confirmação da localização das fugas..... | 61 |
| 5.4 | Inspecções em ar comprimido | 63 |
| 5.4.1 | Procedimento de uma inspecção para fugas de ar comprimido..... | 64 |
| 5.5 | Inspecção em sistemas eléctricos..... | 66 |
| 5.5.1 | Introdução..... | 66 |
| 5.5.2 | Emissão e inspecção de ultra-sons na electricidade | 67 |
| 5.5.3 | Efeito de coroa..... | 67 |
| 5.5.4 | Descargas eléctricas..... | 69 |
| 5.5.5 | Arco eléctrico | 71 |
| 5.5.6 | Ultra-sons e a termografia | 73 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.5.7 | Inspecção visual..... | 74 |
| 5.5.8 | Inspecção de baixa voltagem..... | 74 |
| 5.5.9 | Inspecção de voltagem média e alta | 74 |
| 5.5.10 | Procedimentos e técnicas de inspecção | 75 |
| 5.5.11 | Ultra-sons concorrentes e técnicas de blindagem..... | 75 |
| 5.6 | Inspecção de válvulas | 77 |
| 5.6.1 | A inspecção através de estruturas..... | 77 |
| 5.6.2 | Válvulas..... | 77 |
| 5.7 | Inspecções mecânicas | 83 |
| 5.7.1 | Técnicas e procedimentos de inspecção | 84 |
| 5.7.2 | Lubrificação..... | 90 |
| 5.7.3 | Inspecção Mecânica de rolamentos de telas transportadoras | 91 |
| 6. | CASOS DE ESTUDO | 92 |
| 6.1 | Introdução | 92 |
| 6.2 | Equipamentos de medição | 94 |
| 6.2.1 | Equipamento de ultra-sons – Ultraprobe 9000 da EU Systems | 94 |
| 6.2.2 | Analizador de Vibrações – CSI 2130 da Emerson | 96 |
| 6.3 | Caso de Estudo 1 - Programa de controlo de condição em ambiente industrial..... | 97 |
| 6.3.1 | Equipamento: Ventilador V1001..... | 99 |
| 6.3.2 | Equipamento: Ventilador V233..... | 108 |
| 6.3.3 | Equipamento: Ventilador V361A..... | 115 |
| 6.4 | Caso de Estudo 2 - Modelo didáctico com simulação de defeitos em rolamentos | 122 |
| 6.4.1 | Ensaios e resultados – Rolamento sem defeitos (Ensaio 1)..... | 126 |
| 6.4.2 | Ensaios e resultados – Rolamento com defeito da pista interna (Ensaio 2) | 130 |
| 6.4.3 | Ensaios e resultados – Rolamento com defeito no rolo (Ensaio 3) | 133 |
| 7. | CONCLUSÕES | 136 |
| | Sugestões para trabalhos futuros | 139 |
| | BIBLIOGRAFIA | 140 |
| | ANEXOS..... | 144 |
| | ANEXO I – Informação técnica do equipamento de medição Ultraprobe 9000 da UE Systems..... | 145 |
| | ANEXO II – Informação técnica do equipamento de medição CSI 2130 da Emerson..... | 146 |

ANEXO III – Informação técnica do acelerómetro usado na recolha de dados:
A0760GP 147

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Evolução dos sistemas administrativos e de gestão, adaptado (Smith, 1993)..... | 7 |
| Figura 2.2 - Representação das estratégias de manutenção, adaptado (NP EN 13306:2007)..... | 9 |
| Figura 2.3 - Princípio da manutenção correctiva (Teknikao, 2012)..... | 10 |
| Figura 2.4 - Princípio da manutenção preventiva (Teknikao, 2012)..... | 11 |
| Figura 2.5 – Comportamento de falha..... | 12 |
| Figura 3.1 - Lucro versus disponibilidade (Murty, 1995)..... | 16 |
| Figura 3.2 - Imagens obtida através de uma câmara termográfica (FLIR Systems, Inc, 2014)..... | 21 |
| Figura 4.1 – Sistema massa mola..... | 28 |
| Figura 4.2 – Movimento harmónico simples, adaptado (Sequeira, 2012)..... | 28 |
| Figura 4.3 - Formas de representar a amplitude..... | 29 |
| Figura 4.4 – Esquema de classificação dos tipos de vibrações..... | 31 |
| Figura 4.5 – Curva de resposta característica do acelerómetro (Sequeira, 2005)..... | 36 |
| Figura 4.6 – Tipos de fixação do acelerómetro (Roque, 2005)..... | 37 |
| Figura 4.7 – Exemplo de fixação com base magnética em motor eléctrico..... | 38 |
| Figura 4.8 – Frequência em função da fixação (Roque, 2006)..... | 39 |
| Figura 4.9 - Geometria do rolamento (Roque <i>et al.</i> (2008)..... | 40 |
| Figura 4.10 - Geometria do rolamento - ângulo de contacto θ (Roque <i>et al.</i> (2008)..... | 41 |
| Figura 5.1 – Espectro sonoro..... | 46 |
| Figura 5.3 – Tipos de escoamento..... | 51 |
| Figura 5.4 – Tipos de fugas..... | 51 |
| Figura 5.5 – Fuga em forma de orifício (UE Systems inc, 2007)..... | 52 |
| Figura 5.6 - Módulo de varrimento/aproximação..... | 54 |
| Figura 5.7 - Sensor parabólico..... | 55 |
| Figura 5.9 - Sonda flexível..... | 56 |
| Figura 5.10 - Sonda de foco (borracha)..... | 56 |
| Figura 5.11 – Representação de uma fuga em pressão..... | 57 |
| Figura 5.12 - Representação de uma fuga em vazio..... | 58 |
| Figura 5.13 - Método “grande a fino” (UE Systems inc, 2007)..... | 60 |
| Figura 5.14 – Método de posição (SDT, 2014)..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.15 – Colocação de chapa metálica para blindagem de ultra-sons (UE Systems inc, 2007)..... | 62 |
| Figura 5.16 - Técnica de mão e do trapo (UE Systems inc, 2007)..... | 63 |
| Figura 5.17 – Espectro de frequência para o efeito de coroa, para o sistema eléctrico dos EUA (60Hz)..... | 68 |
| Figura 5.18 - Forma de onda do efeito de coroa, para o sistema eléctrico dos EUA (60Hz)..... | 68 |
| Figura 5.19 – Pontos de descarga na forma de onda do efeito de coroa. | 69 |
| Figura 5.20 – Espectro de frequência para a descarga eléctrica..... | 70 |
| Figura 5.21 - Forma de onda da descarga eléctrica..... | 70 |
| Figura 5.22 – Pontos de descarga - descarga eléctrica..... | 71 |
| Figura 5.24 – Forma de onda no tempo do arco eléctrico..... | 72 |
| Figura 5.25 – Pontos de descarga do arco eléctrico..... | 73 |
| Figura 5.26 – Inspeção eléctrica com sensor parabólico (SDT, 2014)..... | 76 |
| Figura 5.27 –Pontos de medida para inspeção de válvulas, adaptado (UE Systems inc, 2007)..... | 78 |
| Figura 5.28 – Distância dos pontos de medição para ensaios em válvulas, adaptado (UE Systems inc, 2007)..... | 79 |
| Figura 5.29 – Exemplo dos níveis sonoros por pontos de amostragem para uma válvula com fugas, adaptado (UE Systems inc, 2007)..... | 80 |
| Figura 5.30 - Exemplo dos níveis sonoros por pontos de amostragem para uma válvula fechada, adaptado (UE Systems inc, 2007)..... | 80 |
| Figura 5.31 – Exemplos de níveis sonoros medidos em vários pontos de medição, adaptado (UE Systems inc, 2007)..... | 81 |
| Figura 5.32 – Espectros de frequência para vários pontos de medição (por exemplo A, B, C e D), adaptado (UE Systems inc, 2007)..... | 82 |
| Figura 5.33 – Forma de onda do sinal no tempo para uma válvula a funcionar correctamente e com defeitos, adaptado (UE Systems inc, 2007)..... | 82 |
| Figura 5.34 – Exemplo de uma curva de tendência..... | 89 |
| Figura 6.1 – Equipamento usado nas medições de ultra-sons: Ultraprobe 9000..... | 94 |
| Figura 6.2 - Componentes do equipamento – Ultraprobe 9000..... | 95 |
| Figura 6.3 – Módulo de contacto (estetoscópio)..... | 96 |
| Figura 6.4 - Analisador de Vibrações - CSI 2130 da Emerson..... | 96 |
| Figura 6.5 – Acelerómetro usado na recolha de dados: A0760GP..... | 97 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.6 – Equipamento: Ventilador V1001 com indicação dos pontos de medida. .. | 99 |
| Figura 6.7 - Colocação do acelerómetro no ponto P3 para medição das vibrações. | 99 |
| Figura 6.8 - Colocação do Ultraprobe 9000 para medição no ponto P3 e P4. | 100 |
| Figura 6.9 - Visualização do display do equipamento de ultra-sons. | 100 |
| Figura 6.10 - Espectro de frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V1001. | 101 |
| Figura 6.11 - Espectro de frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V1001. | 102 |
| Figura 6.12 – Comparação entre o aspecto das chumaceiras velhas e as novas. | 103 |
| Figura 6.13 - Espectro de frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V1001. | 104 |
| Figura 6.14 - Espectro de frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V1001. | 104 |
| Figura 6.15 – Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V1001. | 106 |
| Figura 6.16 - Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V1001. | 106 |
| Figura 6.17 - Comparação dos níveis sonoros de ultra-sons medidos nas duas campanhas - V1001. | 107 |
| Figura 6.18 – Equipamento: Ventilador V233, com indicação dos pontos de medida. | 108 |
| Figura 6.19 - Colocação do Ultraprobe 9000 para medição nos pontos P3 e P4 – V233. | 109 |
| Figura 6.20 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V233. | 109 |
| Figura 6.22 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V233. | 111 |
| Figura 6.23 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V233. | 111 |
| Figura 6.24 - Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V233. | 113 |
| Figura 6.25 - Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V233. | 113 |
| Figura 6.26 - Comparação dos níveis sonoros de ultra-sons medidos nas duas campanhas – V233. | 114 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.27 - Equipamento: Ventilador V361A com indicação dos pontos de medida. | 115 |
| Figura 6.28 - Colocação do Ultraprobe 9000 para medição no ponto P3 e P4. | 116 |
| Figura 6.29 - Espectro de frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V361A. | 116 |
| Figura 6.30 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V361A. | 117 |
| Figura 6.31 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V361A. | 118 |
| Figura 6.32 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V361A. | 118 |
| Figura 6.33 - Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V361A..... | 120 |
| Figura 6.34 - Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V361A..... | 120 |
| Figura 6.35 - Comparação dos níveis sonoros de ultra-sons medidos nas duas campanhas – V361A..... | 121 |
| Figura 6.36 – Modelo didático para ensaios de rolamentos e bancada de trabalho.... | 122 |
| Figura 6.37 – Utilização da Lâmpada Estroboscópica. | 123 |
| Figura 6.38 - Defeito na pista interna do rolamento..... | 124 |
| Figura 6.39 - Defeito no rolo do rolamento..... | 124 |
| Figura 6.40 – Localização do acelerómetro para medição das vibrações com o equipamento CSI 2130. | 125 |
| Figura 6.41 – Medição dos ultra-sons com o Ultraprobe 9000 | 125 |
| Figura 6.42 - Espectro da envolvente – Ensaio 1. | 126 |
| Figura 6.43 - Sinal no tempo em g's – Ensaio 1..... | 128 |
| Figura 6.44 – Espectro do sinal de ruído dos ultra-sons – Ensaio 1..... | 129 |
| Figura 6.45 - Sinal no tempo do ruído dos ultra-sons – Ensaio 1..... | 129 |
| Figura 6.46 - Espectro da envolvente – Ensaio 2. | 130 |
| Figura 6.47 - Sinal no tempo em g's – Ensaio 2..... | 131 |
| Figura 6.48 – Espectro do sinal de ruído dos ultra-sons – Ensaio 2..... | 132 |
| Figura 6.49 - Sinal no tempo do ruído dos ultra-sons – Ensaio 2..... | 132 |
| Figura 6.51 - Sinal no tempo em g's – Ensaio 3..... | 134 |
| Figura 6.52 - Espectro do sinal de ruído dos ultra-sons – Ensaio 3. | 135 |

Figura 6.53 - Sinal no tempo do ruído dos ultra-sons – Ensaio 3..... 135

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.1 – Unidades de vibração..... | 30 |
| Tabela 4.2 - Unidade de vibração para cada gama de velocidade de rotação da máquina. | 30 |
| Tabela 6.3 - Níveis sonoros de ultra-sons medidos na 1. ^a campanha – V233..... | 110 |
| Tabela 6.4 - Níveis sonoros de ultra-sons medidos na 2. ^a campanha – V233..... | 112 |
| Tabela 6.5 - Níveis sonoros de ultra-sons medidos na 1. ^a campanha – V361A..... | 117 |
| Tabela 6.6 - Níveis sonoros de ultra-sons medidos na 2. ^a campanha – V361A..... | 119 |
| Tabela 6.7 – Características gerais dos rolamentos ensaios | 123 |
| Tabela 6.9 - Níveis sonoros dos ultra-sons – Ensaio 2..... | 131 |
| Tabela 6.10 - Níveis sonoros dos ultra-sons – Ensaio 3..... | 134 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento da Dissertação

A competitividade sempre foi um factor de grande importância na indústria contemporânea. Com a globalização, verificou-se nas últimas décadas um aumento da competitividade a que as empresas estão sujeitas assumindo agora um nível crítico. A procura de uma melhoria contínua em todas as áreas que possam suscitar uma vantagem competitiva é agora uma obrigação que não se pode, de forma alguma, desperdiçar para alcançar o tão desejado sucesso.

De entre as várias áreas susceptíveis de aumentar a eficiência das empresas industriais, reduzindo custos e aumentando a disponibilidade, encontra-se a manutenção. Durante vários anos, foi uma área esquecida pela maioria das empresas, tendo sido mesmo posta de lado e desprezada face à área produtiva. A manutenção era considerada um mal necessário, envolvendo a realização de reparações apenas quando indispensável (Park & Han, 2001).

A via para manter e ganhar novos mercados está sem dúvida na qualidade e na produtividade, sendo que a busca pelos mesmos passa por uma série de questões, como as políticas de gestão da qualidade, a análise do melhor sistema de produção, a manutenção da produção, bem como, outros factores estratégicos.

Tradicionalmente, manutenção e qualidade têm sido analisadas separadamente, contudo estes conceitos estão intrinsecamente ligados, uma vez que a deterioração das condições óptimas de funcionamento do equipamento leva a desvios no processo e à redução da qualidade. A busca pela qualidade do processo e do produto passa pela qualidade da manutenção, sem a qual o montante investido em sistemas de gestão da qualidade pode ser inteiramente perdido.

A Manutenção industrial representa, por tudo isto, uma preocupação crescente das empresas, e o objectivo de aumentar a fiabilidade dos equipamentos torna-se de crucial importância. É fundamental que a manutenção assuma um papel de permanente intervenção quer na conservação dos equipamentos existentes, quer na aquisição de novos equipamentos.

A utilização de ferramentas de controlo de condição (como os ultra-sons propagados no ar e estruturas) na área da manutenção parece neste contexto bastante pertinente e com enorme potencial, sendo esta uma técnica poderosa.

São escassas as publicações em controlo de condição que utilizem este género de técnica, no entanto a sua validação prática trará sem dúvida grandes benefícios ao controlo de condição de equipamentos.

1.2 Objectivos da Dissertação

O objectivo do presente trabalho centra-se na pesquisa e desenvolvimento de metodologias tendo por base os ultra-sons propagados no ar e estruturas como técnica de controlo de condição de um equipamento, facilitando a detecção antecipada de prováveis avarias e perdas nos processos produtivos e contribuir para o desenvolvimento e aplicação da técnica de ultra-sons propagados no ar e estruturas por parte das empresas.

Verifica-se que esta técnica para o controlo de condição é pouco utilizada por parte das empresas portuguesas, quando comparada com a análise de vibrações, por exemplo. Desta forma, pretende-se com este trabalho dar a conhecer o que são os ultra-sons propagados no ar e estruturas, os tipos de inspecções que se podem fazer com estes, e organizar uma série de procedimentos, por forma a que quem tenha interesse os consiga colocar em prática. Além deste seguimento mais teórico, efectuou-se também uma abordagem prática à análise do estado de condição de rolamentos com recurso aos ultra-sons e posteriormente correlação destes com as técnicas clássicas da análise de vibrações. A abordagem prática a esta temática foi desenvolvida em duas partes. A primeira parte consistiu em realizar medições em empresa industrial e a segunda parte em bancada laboratorial recorrendo a modelo didáctico. Estes trabalhos só foram possíveis com o apoio da empresa DatAnálise – Serviços e Técnicas de Manutenção, Lda.

O presente estudo pretende mostrar o potencial da utilização dos ultra-sons propagados no ar e estruturas como técnica a ser integrada nos programas de manutenção condicionada, de forma a complementar a análise e diagnósticos no controlo de condição de equipamentos. O objectivo deste trabalho, passa também por explorar os

procedimentos que devem ser tomados para se utilizar os ultra-sons em rotinas de controlo de condição.

1.3 Metodologia

A metodologia adoptada no desenvolvimento do presente trabalho pretende fazer a junção das técnicas de controlo de condição: análise de vibrações com os ultra-sons propagados no ar e estruturas.

Estabelecidos os objectivos, iniciou-se o estudo com a revisão da literatura relacionada com estes três temas.

Os desenvolvimentos práticos incidiram sobre dados de ultra-sons e de vibrações, recolhidos em duas campanhas de rotina de controlo de condição de empresa industrial cliente da DatAnálise. Foram ainda realizados uma bateria de ensaios em modelo didáctico simulador de defeitos em rolamentos, em que se colocaram vários rolamentos com defeitos conhecidos e mediu-se os níveis sonoros de ultra-sons e o sinal de vibração. O modelo do equipamento de ultra-sons usado nos ensaios, ainda não possuía a funcionalidade de gravar o sinal para posterior tratamento. Desta forma, foram criadas duas aplicações em LabView, uma para gravar os níveis sonoros e outra para tratamento do sinal. Os dados recolhidos foram tratados e retiradas as devidas conclusões.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos.

No Capítulo 1 - Introdução, apresenta-se de forma genérica o trabalho desenvolvido na dissertação, os objectivos que se pretendem concretiza, a metodologia aplicada e ainda a descrição da organização do documento.

O Capítulo 2 – Manutenção industrial fala dos principais conceitos relacionados com a manutenção industrial bem como a sua evolução ao longo dos tempos. São ainda apresentadas as principais filosofias de manutenção, bem como, as razões que levam a optar por cada uma delas.

No Capítulo 3 – Controlo de condição é feita uma abordagem mais detalhada deste tipo de estratégia de manutenção, uma vez que é aquela que se pretende aplicar no caso de estudo. São apresentados os conceitos fundamentais desta temática, bem como, algumas vantagens e desvantagens da sua utilização.

No Capítulo 4 – Análise de vibrações são apresentados os conceitos básicos sobre as vibrações. Foi também abordada o processo de cálculos para determinar os defeitos em rolamentos.

O Capítulo 5 – Ultra-sons propagados no ar e estruturas contempla uma sucinta apresentação das noções básicas de ultra-sons, procedimentos de medida para os vários tipos de inspeções possíveis de serem realizadas com esta, bem como algumas técnicas e software para a sua análise. São ainda apresentados alguns equipamentos e acessórios de medida utilizados na aquisição de dados desta natureza.

No Capítulo 6 – Casos de Estudo – são apresentados dois casos de estudo. O primeiro, referente ao levantamento de medições realizadas em empresa industrial. O segundo caso, refere-se aos ensaios experimentais realizados em modelo didático simulador de defeitos em rolamentos. São apresentados e analisados os resultados obtidos para ambos os casos de estudo, e feitas as respectivas conclusões.

Finalmente, no Capítulo 7 – Conclusões, é apresentada a conclusão geral da dissertação e o trabalho a desenvolver no futuro.

2. MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

2.1 Introdução

A manutenção tem assumido uma posição estratégica nas organizações, devido ao impacto que esta exerce sobre a competitividade da empresa e seus resultados. Entre os diversos tipos de organização da manutenção existentes, a manutenção preditiva tem ganho destaque junto dos órgãos de decisão empresarial, dado o grande retorno obtido pela sua adopção. Esta manutenção apoia-se na monitorização dos equipamentos de trabalho acompanhando as variações ocorridas nas suas partes críticas, tal como, desgaste ou alguma variação no seu funcionamento, identificando assim potenciais falhas ou problemas que venham a prejudicar o seu desempenho. Diversos são os benefícios adquiridos com a adopção deste sistema, os quais tem impacto de forma directa e indirecta sobre a competitividade da organização e assim sobre seus resultados financeiros.

Estamos numa era marcada por um mercado extremamente competitivo, onde as organizações travam batalhas constantes em busca de melhores desempenhos nas suas operações. Com os avanços tecnológicos existentes, a eficiência operacional tem-se tornado factor chave para a sobrevivência e crescimento das organizações. A actividade industrial actual está cada vez mais exigente quanto aos serviços e produtos utilizados, não admitindo a ocorrência de erros como falha no fornecimento, matéria-prima fora de especificação, entre outros. Desta forma, a organização precisa primar pela confiabilidade e estabilidade do seu processo, de modo que a sua cadeia de valor apresente um fluxo estável e homogéneo, livre de oscilações decorridas de problemas como paragens no processo, mau funcionamento de sua estrutura e equipamentos.

Numa perspectiva ideal, de que toda a manutenção deveria ser previamente planeada de forma a maximizar a utilização dos recursos e a minimizar os inconvenientes devidos a avarias e a paragens indesejadas dos equipamentos, o tipo de filosofia de Manutenção a adoptar deve ser realmente a manutenção condicionada.

2.2 Evolução histórica do conceito de Manutenção

A evolução do conceito de manutenção está directamente relacionada com o desenvolvimento técnico-industrial da humanidade. Desde o seu nascimento, até aos dias de hoje, o conceito de manutenção foi marcado por várias gerações de desenvolvimento, estando o seu avanço relacionado com o progresso tecnológico que se verificou nas últimas décadas (Kardec & Nascif, 2009). A classificação da manutenção, tendo em conta a sua evolução histórica, pode ser sintetizada até ao século XX, nas seguintes fases:

1.ª Fase – até cerca de 1914, a manutenção tinha pouca importância, sendo considerada como secundária no processo produtivo. As indústrias da época não tinham equipas especializadas em manutenção, limitando-se a produzir o máximo possível nos seus equipamentos até que estes deixassem de funcionar (Kardec & Nascif, 2009). A partir da 1ª Guerra Mundial, as organizações, numa tentativa de conseguir assegurar uma produção mínima, passaram a fazer a manutenção correctiva dos seus equipamentos, isto é, quando estes avariavam eram reparados e voltavam ao processo produtivo (Kardec & Nascif, 2009).

2.ª Fase - Com a 2ª Guerra Mundial, verifica-se uma enorme pressão sobre o tecido industrial para produzir bens para o esforço de guerra, mas em simultâneo a mão-de-obra disponível é escassa. Isto levou na altura a uma crescente mecanização dos processos industriais com o aumento da complexidade e diversidade das máquinas. Esta maior dependência da indústria pelas máquinas, significa que é agora cada vez menos aceitável o estado de indisponibilidade dos equipamentos. Indisponibilidade significa aqui prejuízo por cada hora de paragem das máquinas, pelo que é exigido à manutenção que as falhas dos equipamentos possam e devam ser prevenidas ou mesmo impedidas. O novo conceito de manutenção preventiva, surgido na década de 50 (Scheffer & Girdhar, 2004), significava essencialmente intervenções ou revisões dos equipamentos realizadas a intervalos regulares, como por exemplo número de horas de funcionamento, número de arranques do equipamento, número de ciclos, etc. Esta filosofia de manutenção ficou conhecida como manutenção preventiva sistemática. Nesta fase, as indústrias começaram a criar departamentos autónomos encarregues, não apenas de corrigir as falhas, mas também, de evitar que estas acontecessem. O desenvolvimento da Indústria Aeronáutica, o surgimento da electrónica e o aparecimento do primeiro

computador, contribuíram em larga escala para o avanço do conceito de manutenção (Kardec & Nascif, 2009).

3.ª Fase – Na década de 70, o início da globalização da economia traduziu-se em grandes desafios de produtividade, o que fez incidir o foco também na manutenção. Aumentaram as expectativas em relação às funções e aos resultados da manutenção, às novas interpretações dos processos de falhas de equipamentos e às novas técnicas de análise e implementação da manutenção (Scheffer & Girdhar, 2004).

Verifica-se que apenas em quarenta anos, o conceito de manutenção sofreu alterações visíveis (Figura 2.1), passando de um estado de quase inexistência para uma das maiores prioridades de algumas organizações (Cabral, 2009).

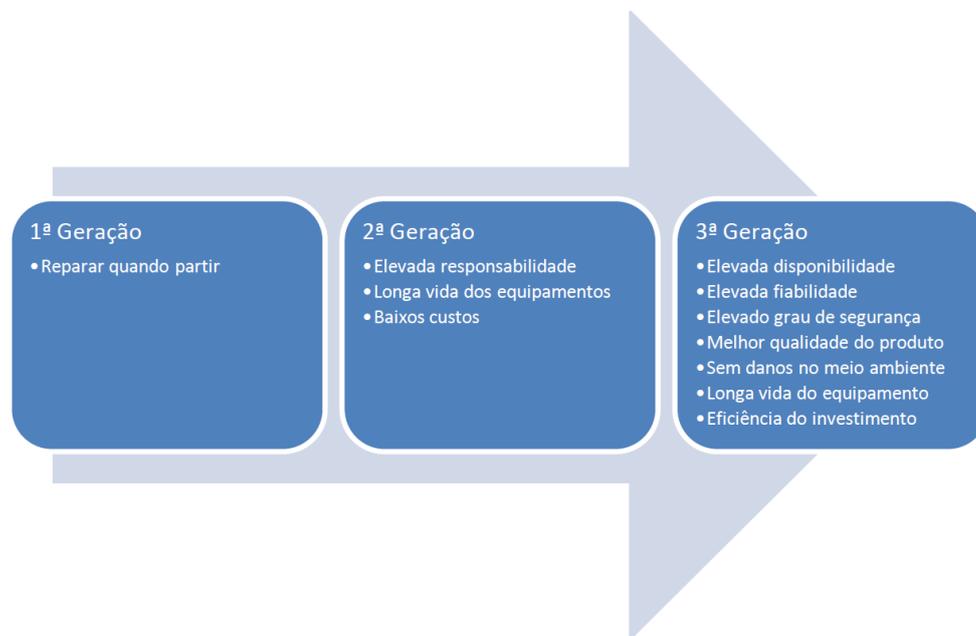


Figura 2.1 – Evolução dos sistemas administrativos e de gestão, adaptado (Smith, 1993).

2.3 Manutenção Industrial

Segundo a Norma Portuguesa NP EN 13306:2007, manutenção é a combinação de todas as acções técnicas, administrativas e de gestão, durante um ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida. Ainda segundo a mesma norma, a gestão da manutenção são todas as actividades de gestão que determinam os objectivos, a estratégia e as responsabilidades

respeitantes à manutenção, cujos objectivos são implementar, por diversos meios tais, como, o planeamento, o controlo e supervisão da manutenção e a melhoria de métodos na organização, incluindo os aspectos económicos.

A manutenção é muito importante na indústria no sentido da produção do maior número de produtos sem que os equipamentos se avariem. Desta forma, a manutenção realizada com recurso a meios internos à organização ou através de serviço prestado por fornecedores externos especializados, mostra-se fulcral no sucesso das organizações, uma vez que possibilita que os equipamentos de produção estejam aptos para desempenhar as suas funções ao nível que lhes é exigido (NP 4483:2008).

2.4 Estratégias de Manutenção

A origem das avarias nos equipamentos está relacionada com inúmeros factores, que podem passar pelas opções do projectista, pela forma como é feita a sua instalação, pelas práticas inadequadas de manutenção, condições de operação e também pela natural deterioração dos equipamentos. Todos estes factores contribuem de forma relevante para o tempo de vida da respectiva máquina. Manifestamente, nem todos estes factores estão sob o controlo das organizações que possuem os equipamentos, mas o conhecimento de potenciais problemas ajudará a apontar soluções de melhoria a implementar no futuro.

Após a introdução do conceito de manutenção industrial e a sua relevância, no que respeita ao processo produtivo das organizações, torna-se fundamental apresentar agora uma abordagem às diferentes estratégias de manutenção utilizadas na indústria. De salientar que a abordagem a estas diferentes estratégias de manutenção poderá ser ligeiramente diferente dependendo do autor de referência, no entanto, estes conceitos são apresentados, aqui segundo o especificado na Norma Portuguesa NP EN 13306:2007.

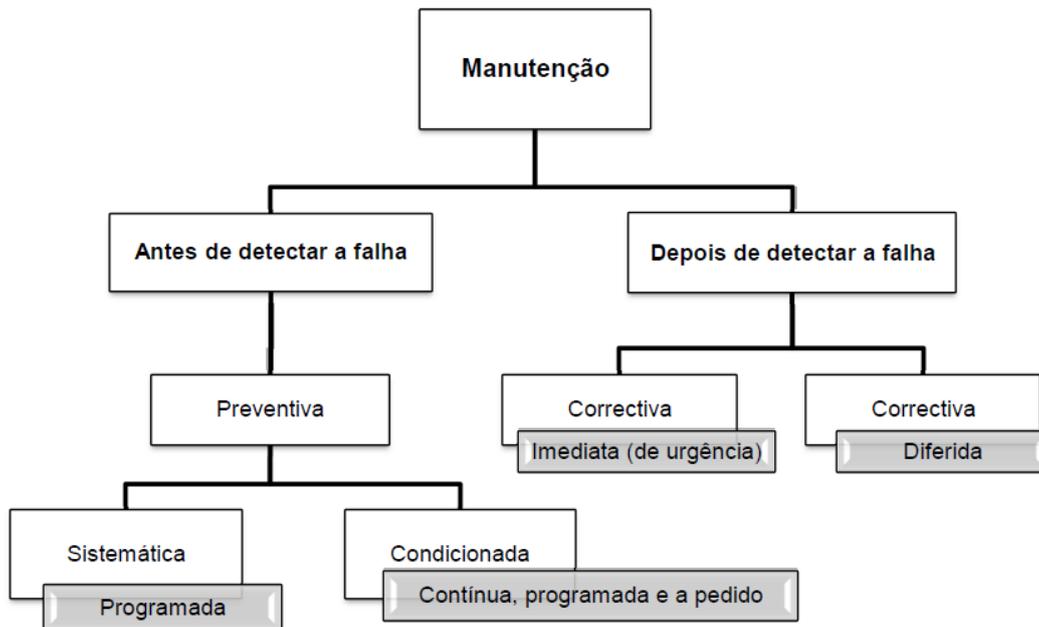


Figura 2.2 - Representação das estratégias de manutenção, adaptado (NP EN 13306:2007).

De acordo com o esquema da Figura 2.2, as estratégias de manutenção são essencialmente duas, Preventiva e Correctiva, sendo que a primeira é uma estratégia aplicada antes da detecção da falha, ao contrário da segunda, que é posterior. Pode ainda distinguir-se dentro da manutenção preventiva, a manutenção sistemática e a manutenção condicionada.

2.4.1 Manutenção Correctiva

A manutenção correctiva é efectuada após a ocorrência da avaria, com o objectivo de repor o equipamento a funcionar novamente. A manutenção correctiva pode ser efectuada imediatamente após a detecção da falha (de urgência) de forma a evitar consequências inaceitáveis, ou algum tempo depois dessa detecção (diferida). Na primeira situação, a filosofia adoptada é a de deixar as máquinas funcionar até ocorrer uma avaria, isto é, a manutenção não é programada (Assis, 2004). A segunda situação acontece quando a anomalia se revela no equipamento gradualmente. A manutenção pode intervir de forma programada num momento mais conveniente, continuando, no entanto a tratar-se de uma política de manutenção correctiva (Assis, 2004).

A manutenção correctiva, como qualquer outro tipo de manutenção, apresenta algumas vantagens, tais como, o facto de não envolver custos relativos ao controlo de condição e

não levar a sobremanutenção das máquinas (Mobius Institute, 2005). Como desvantagens desta filosofia de manutenção apresentam-se, entre outras, o facto de os equipamentos funcionarem sem controlo, o que resulta, muitas vezes, em avarias catastróficas (originando custos de reparação avultados) e a necessidade de grandes níveis de stock de peças de reposição (Scheffer & Girdhar, 2004).

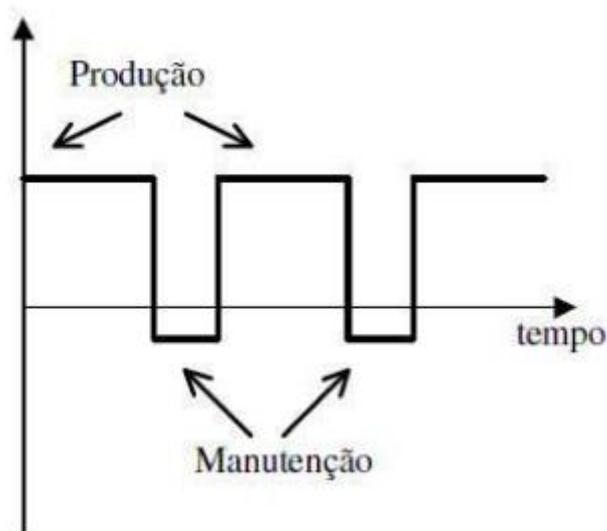


Figura 2.3 - Princípio da manutenção correctiva (Teknikao, 2012).

2.4.2 Manutenção Preventiva Sistemática

Manutenção preventiva sistemática é um tipo de manutenção que obedece a um determinado calendário de intervenção, não existindo necessariamente controlo prévio do estado do equipamento. Este tipo de manutenção implica o conhecimento do padrão típico da evolução da falha, seja por análise estatística da informação recolhida por registos anteriores, seja por informação fornecida pelo fabricante do equipamento. São exemplo de manutenção sistemática as mudanças de óleo ou filtros feitas a intervalos de quilometragem regulares em automóveis.

O facto de as máquinas serem frequentemente “reparadas” sem necessidade (resultando muitas vezes, noutra tipo de avarias), a utilização de um maior número de peças, o aumento dos custos resultantes do aumento das acções de manutenção e o facto de a manutenção aplicada ser semelhante para os vários equipamentos (sem levar em conta as características individuais de cada um) são as suas principais desvantagens da manutenção preventiva sistemática (Dhillon, 2002).

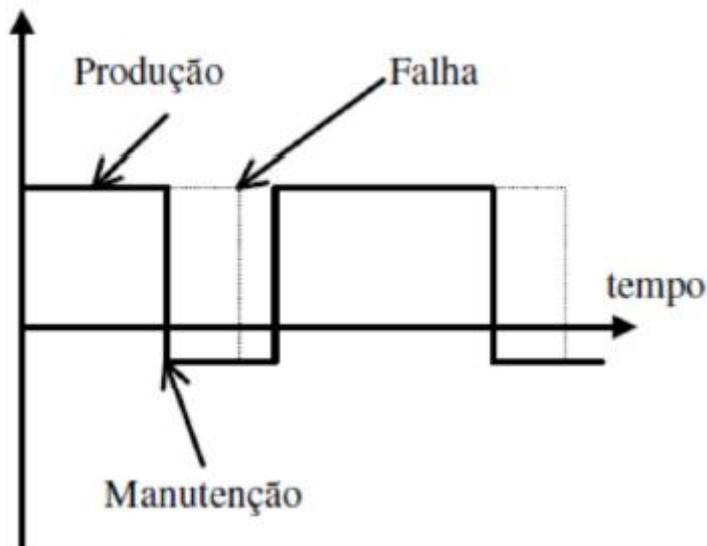


Figura 2.4 - Princípio da manutenção preventiva (Teknikao, 2012).

2.4.3 Manutenção Preventiva Condicionada

Manutenção preventiva sistemática é a manutenção efectuada mediante avaliação do estado da máquina, usualmente é efectuada de forma contínua. Este tipo de manutenção é frequentemente também chamada de manutenção preditiva. Por outras palavras, esta política permite aumentar a fiabilidade e disponibilidade dos equipamentos através da detecção prévia das avarias iminentes, recorrendo a técnicas de monitorização, que podem ser aplicadas de forma contínua ou discreta. O sucesso deste tipo de manutenção depende ainda da eficácia dos recursos utilizados na monitorização dos equipamentos (Randall, 2011). Este método apresenta vantagens das quais se podem realçar (Mobius Institute, 2005):

- Aumento da qualidade de produção;
- Melhorias na gestão de componentes das máquinas (são encomendados e utilizados apenas quando necessário);
- Eliminação de revisões desnecessárias;
- Redução das perdas de produção não programadas;
- Redução de custos de manutenção e de alguns outros factores indirectos dos custos de produção.

Em relação aos outros tipos de manutenção, este apresenta também algumas desvantagens (Scheffer & Girdhar, 2004):

- Custo dos equipamentos, sistemas, serviços e pessoal (normalmente bastante elevados);
- Não garante o aumento do tempo de vida útil do equipamento;
- Aumento do trabalho e dos custos de manutenção caso exista uma avaliação errada da deterioração do equipamento.

A grande diferença entre estes dois tipos de manutenção preventiva, é que, enquanto a sistemática é programada, a condicionada é posta em acção apenas quando o alarme surge. Isto permite uma maior utilização de todos os equipamentos e também evita alguma das intervenções desnecessárias realizadas pela sistemática (Randall, 2011).

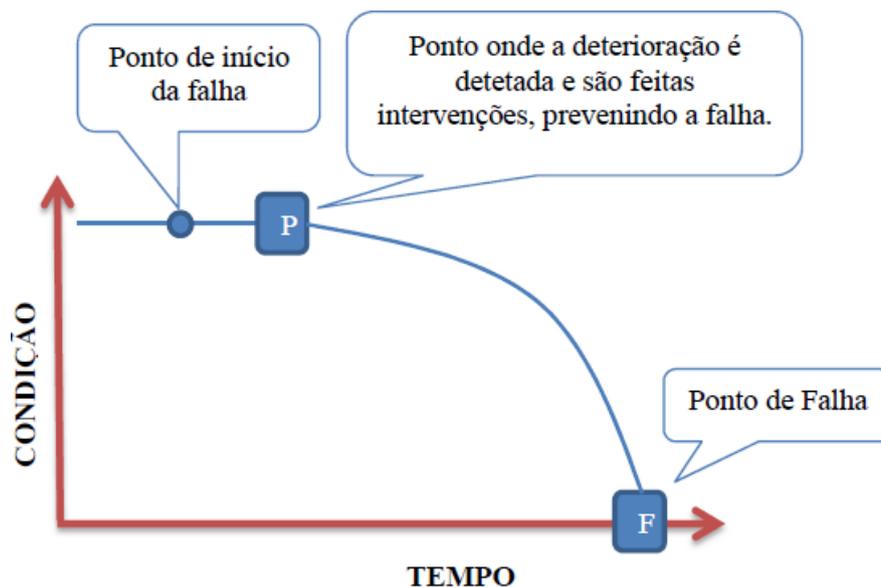


Figura 2.5 – Comportamento de falha.

2.4.4 Manutenção por Oportunidade

Manutenção por oportunidade consiste na reparação dos componentes dos equipamentos, que se encontram normalmente escondidos, e que são expostos quando se realiza a manutenção correctiva ou manutenção preventiva (Saranga, 2002). Pretende-se com este método substituir os elementos que apresentam desgaste evitando problemas num futuro próximo.

É no entanto, necessário ter a consciência de que, apesar de existirem todas estas políticas e estratégias de manutenção, capazes de prevenir as falhas na maioria das

situações, existem falhas graves, impossíveis de prever ou controlar, que resultam muitas vezes em grandes catástrofes ambientais (Saranga, 2002).

3. CONTROLO DE CONDIÇÃO

3.1 Introdução

O controlo de condição, de acordo com os registos, surge durante a segunda guerra mundial, numa empresa de caminho-de-ferro, a "Canadian Pacific Railways". Apesar da tecnologia da altura ser bastante limitada foi claramente reconhecida a utilização da manutenção condicionada (Collacott, 1981). O Controlo de condição desenvolveu-se em seguida com o crescimento da indústria de instrumentação nos E.U.A., por volta de 1950. Métodos de controlo de vibração foram desenvolvidos também por esta altura e aplicados principalmente em acções militares. Entretanto, outras empresas mostraram igualmente interesse na área de controlo de condição entre as quais se podem salientar: British Airways, British Coal, The Central Electricity Generating Board, Imperial Chemical Industries e British Petroleum Tankers Ltd. (Collacott, 1981).

No final dos anos 70 emergiu a indústria da manutenção condicionada, com várias empresas a publicitarem equipamento de controlo de condição. Foram implementadas, com interesse crescente, técnicas de manutenção condicionada em vários sectores da indústria (Mullin, 1988).

Nos anos 80, com o rápido desenvolvimento da microelectrónica, verificou-se novo e reforçado interesse pelo controlo de condição. É nesta altura que surgem sensores e uma grande quantidade de instrumentos industriais com tecnologia computacional, de baixo custo e portáteis. A microelectrónica leva ao desenvolvimento e aplicação de novas técnicas de controlo de condição, tirando partido da utilização de instrumentação inteligente com elevadas capacidades de computação, e facilita o desenvolvimento e exploração de sistemas de fabrico automatizados integrando funções de controlo de condição (Davies, 1990).

A partir de 1980 são aplicados métodos sofisticados de controlo de condição que utilizam instrumentação de elevada tecnologia, sensores diversos e sistemas de análise inteligentes. O controlo de condição tornou então possível a implementação de metodologias de manutenção de condição.

O controlo de condição requer disciplina, dado que toda a informação necessária, nomeadamente análises e inspecções, só deve ser fornecida na altura própria e os

resultados devem ser correctamente interpretados para permitir acções correctas na altura mais apropriada. A quantidade de trabalho associado e os custos implícitos são consideráveis e, como tal, não devem ser subestimados. O que leva a que na maior parte das circunstâncias o controle de condição permaneça restrito ao uso da manutenção condicionada.

Neste capítulo são ainda apresentadas as principais técnicas/tecnologias de controlo de condição e as suas principais aplicações (ver secção 3.4).

3.2 Objectivos e Conceitos Fundamentais

Quando se fala na importância da “vida” e “saúde” de um equipamento, deve também fazer-se referência a três conceitos: fiabilidade, disponibilidade e manutibilidade.

Fiabilidade é definida como “aptidão de um bem para cumprir uma função requerida, sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo” (NP EN 13306:2007).

Disponibilidade é definida como “a aptidão de um bem para estar em estado de cumprir uma função requerida em condições determinadas, em cada instante ou durante determinado intervalo de tempo, assumindo que é assegurado o fornecimento dos necessários meios exteriores” (NP EN 13306:2007).

Manutibilidade é definida como: “aptidão de um bem sob condições de utilização, definidas de ser mantido ou repostado num estado em que possa cumprir uma função requerida depois de lhe ser aplicada manutenção em condições determinadas, utilizando procedimentos e meios prescritos” (NP EN 13306:2007).

Enquanto que a manutibilidade está associada com a capacidade de um dispositivo ser recolocado nas condições originais a cada vez que surja necessidade de manutenção, a manutenção representa a acção física executada por técnicos para que a recolocação nos níveis originais seja conseguida. A disponibilidade, ou seja, a probabilidade de assegurar um bem requerido, não é possível sem fiabilidade e manutibilidade.

Assim sendo, a disponibilidade (D) depende da fiabilidade e da manutibilidade segundo a equação:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (1)$$

em que:

MTBF – Tempo Médio entre Avarias (Mean Time Between Failures)

MTTR – Tempo Médio de reparação (Mean Time To Repair)

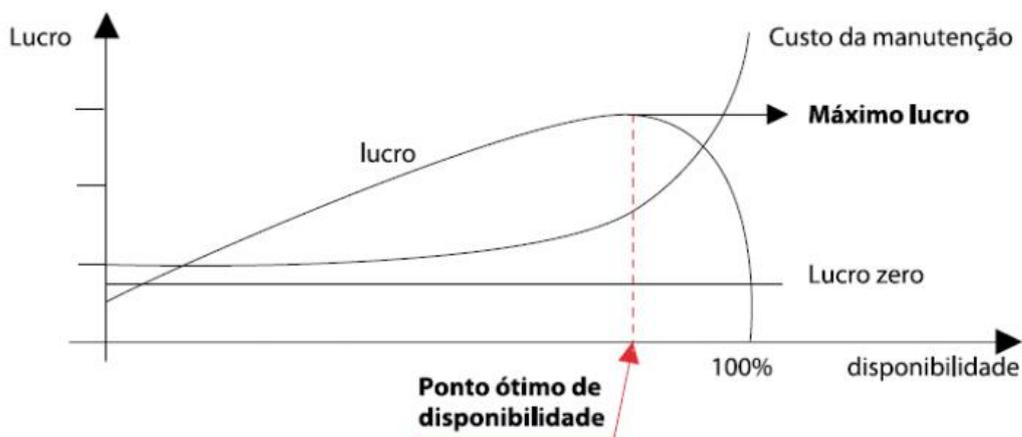


Figura 3.1 - Lucro versus disponibilidade (Murty, 1995).

De acordo com a equação (1), o aumento da disponibilidade do sistema é possível com o crescimento da fiabilidade dos equipamentos e/ou a diminuição da duração das intervenções. O MTBF está relacionado com a fiabilidade do sistema através da taxa de avarias (λ), enquanto o MTTR está relacionado com a manutibilidade do sistema através da taxa de reparação (μ). Conclui-se então que fiabilidade e manutibilidade são cruciais para a disponibilidade do sistema.

Para assegurar a disponibilidade de um sistema podem ser utilizadas diferentes técnicas, entre as quais se pode destacar o controlo de condição cuja, filosofia pode ser descrita da seguinte maneira (Davies, 1990): "O acesso à condição corrente da instalação e do equipamento através do uso de técnicas que podem ser suportadas por instrumentação computadorizada sofisticada, de forma a prever avarias e melhorar o desempenho da manutenção, a qual fica sujeita à identificação de avarias potenciais e à permissão do escalonamento da manutenção".

Por outras palavras, esta técnica permite aumentar a fiabilidade do sistema permitindo a detecção prévia de avarias iminentes através da realização de inspecções qualitativas e quantitativas e da análise de tendências, diminuindo as avarias do sistema. A detecção prévia de avarias eminentes, ou seja, a previsão de avarias, evita o aparecimento de avarias intempestivas e aumenta a disponibilidade do sistema, uma vez que há tempo para planear as paragens para reparação de acordo com o departamento de produção. A possibilidade de diagnóstico associada ao controlo de condição, melhora a fiabilidade do sistema, uma vez que são determinadas tanto a avaria como a causa e o local da mesma avaria. Por outro lado, a manutibilidade do sistema aumenta uma vez que é possível planear as intervenções de manutenção de uma forma mais distribuída e gerir de forma mais eficiente o stock de rotáveis/sobresselentes e os recursos humanos afectos às equipas de manutenção. O Sistema ideal seria aquele em que a condição do equipamento monitorado poderia ser conhecida em qualquer momento, suportando a previsão correcta de todas as potenciais avarias. Esta mesma informação serviria para a própria aprendizagem do sistema através de um sistema de apoio ao diagnóstico baseado em conhecimento.

A British Standard BS 3811:1984 define controlo de condição como: "A medida continua ou periódica e a interpretação de um acontecimento representativo para a determinação da necessidade de manutenção".

O controlo de condição utiliza um conjunto de equipamentos e técnicas de supervisão da instalação fabril que permite avisos prévios da deterioração e possíveis paragens intempestivas dos equipamentos. As medidas de parâmetros como temperatura e vibração, realizadas de forma continua ou periódica, são comparadas com valores de referência, obtidos por exemplo durante um período de análise e parametrização do sistema. O resultado permite também avaliar, de uma forma global, a deterioração de uma parte ou da totalidade do sistema. Este conjunto de equipamentos e técnicas, e ainda um conjunto de interfaces que se podem associar ao controlo de condição, possibilitam o controlo global do sistema de fabrico do ponto de vista da manutenção (Davies, 1990):

- Monitorização contínua ou periódica de áreas críticas da instalação ou do equipamento, automaticamente e em tempo real;

- Aquisição, arquivo, análise e actualização automática de informação sob a forma de dados quantitativos para a gestão de relatórios, diagnóstico baseado em conhecimento, análises de manutenção e avaliação de diagnóstico;
- Activação de sistemas de alarme, com indicação da fonte da avaria, da sequência dos eventos e do estado de funcionamento corrente do sistema a ser monitorizado;
- Constituição de uma base de dados a partir da qual as avarias do sistema podem ser identificadas contra avarias padrão previamente estabelecidas para cada tipo de equipamento.

O orçamento base, usualmente elevado, inerente a um tal sistema é todavia justificável em empresas cuja instalação fabril ou equipamentos (Davies, 1990):

- São críticos em termos de efeito da avaria ou em termos de segurança;
- Têm características observáveis que permitem estimar a sua deterioração.

3.3 Controlo de Condição

O controlo de condição é aplicado basicamente a equipamentos cuja condição dos seus componentes se deteriora ao longo do tempo (Al-Najjar, 1992). No entanto para a aplicação desta política de manutenção há que ter em conta alguns aspectos, uma vez que esta não é viável em todos os equipamentos. É necessário começar por fazer uma análise de criticidade aos equipamentos, que normalmente se classificam em equipamentos críticos, essenciais e de uso geral. Os equipamentos de uso geral são aqueles cuja falha não afecta a segurança nem a produtividade do processo. Já os equipamentos essenciais são aqueles cuja falha pode restringir uma parte ou até mesmo todo o processo. São equipamentos que exigem moderadas despesas e tempos de reparação. Os equipamentos críticos são aqueles cuja falha pode afectar, com grande impacto, a segurança e a rentabilidade do processo.

Geralmente são equipamentos cuja reparação é muito dispendiosa e demorada (Scheffer & Girdhar, 2004). É sobretudo nos equipamentos críticos (embora por vezes também se aplique a equipamentos essenciais) que se aplica a manutenção condicionada.

Há ainda que ter em consideração, que não se justifica a implementação desta política quando os custos de monitorização se sobrepõem aos prejuízos decorrentes das avarias (se a segurança dos operadores não ficar em causa) (Scheffer & Girdhar, 2004).

Depois de se optar por este tipo de estratégia, há outro aspecto importante a levar em conta, isto é, decidir se a monitorização será feita de forma contínua ou periódica.

Em situações em que o defeito se pode desenvolver num curto espaço de tempo, ou quando o equipamento é de extrema importância para o processo, adopta-se o monitoramento contínuo. Para os restantes equipamentos, cuja falha não tem grande impacto, no que respeita à continuidade operacional, adopta-se um plano de medições periódicas (Saranga, 2002).

O diagnóstico de avarias através do controlo de condição dos equipamentos, em muito se assemelha ao diagnóstico médico feito a um ser humano. Sempre que o corpo apresenta um sintoma, o sistema nervoso fornece a informação (fase de detecção), são efectuados os exames necessários e de seguida é recomendado um tratamento. Acontece algo semelhante com as máquinas, visto que, sempre que o equipamento está com problemas, este exhibe, sob a forma de vários parâmetros (temperatura, vibrações,..), esse sintoma. As falhas dos equipamentos podem ou não ser facilmente detectadas pelo ser humano, e é aqui que entram as várias técnicas de controlo de condição (Scheffer & Girdhar, 2004).

3.4 Técnicas de Controlo de Condição

O controlo de condição recorre a um conjunto de técnicas, que permitem emitir avisos prévios da deterioração dos equipamentos. A medição de parâmetros, feita de forma contínua ou periódica, e a sua posterior comparação com valores de referência, permite uma avaliação global dessa deterioração, quer de uma parte ou de todo o equipamento (Carnero, 2003).

As técnicas de manutenção condicionada são normalmente ensaios não destrutivos, que se efectuam na maioria das vezes sem a necessidade de abrir ou parar os equipamentos,

o que em termos de produtividade se revela uma mais-valia (Concu, Nicolo, & Pani, 2011).

Existem diversas técnicas utilizadas no controlo de condição, das quais se podem destacar: inspecção visual, ultra-sons, termografia, análise dos parâmetros de desempenho, líquidos penetrantes, tribologia e análise de vibrações. Apresenta-se de seguida uma abordagem sucinta a estas técnicas.

3.4.1 Inspeção Visual

Este é um método muitas vezes esquecido na lista das técnicas não destrutivas, no entanto esta técnica é bastante comum e muito poderosa. A inspeção visual consiste na detecção a “olho nu” de indícios de falha. As fugas e as fissuras são exemplos de avarias facilmente identificáveis através deste método (Agency, 2000). Esta é uma técnica geralmente aplicada em simultâneo com outras técnicas, devido ao seu baixo custo. No entanto, é fundamental que o operador seja especializado na área para que esteja apto a fazer uma avaliação correcta da situação (Mobley, Higgins, & Wikoff, 2008).

3.4.2 Ultra-sons

Este método baseia-se na emissão de sons de elevada frequência (muito acima do limite audível) na superfície que se pretende avaliar. O som provoca a vibração mecânica do material constituinte dos equipamentos, vibração que depende não só da frequência e amplitude da excitação provocada, mas também do material, da geometria e da massa desses componentes.

Se existirem vazios de material (por exemplo, quando existem fissuras, poros, etc.), os ecos recebidos são distorcidos, uma vez que a velocidade do som através do ar existente nesses vazios é menor. Neste método é necessária a existência de um bloco padrão (representativo da superfície a avaliar) para que se possa comparar a resposta obtida com aquela que se obtém através da superfície isenta de defeitos. Outro aspecto fundamental no sucesso da implementação desta técnica é a preocupação em minimizar os efeitos decorrentes da interface que se estabelece entre a superfície da peça a avaliar e o equipamento de medição. A competência e experiência dos executantes e intérpretes

são essenciais para a correcta avaliação da situação, nomeadamente no que toca à distinção entre anomalias inócuas e verdadeiros defeitos.

Os ultra-sons são muito utilizados, não só na detecção de defeitos, mas também na medição da espessura de peças. Através desta técnica é possível obter informações bastante úteis e precisas acerca da dimensão dos defeitos mas também no que toca à profundidade a que estes se encontram.

3.4.3 Termografia

A termografia (ver Figura 3.2) assenta no princípio de que qualquer material emite radiação acima do zero absoluto. Após colocar a máquina em funcionamento, a temperatura dos corpos é detectada através da energia infravermelha (calor) libertada. Procede-se à leitura da quantidade de calor que esta irradia, e desta forma, detectam-se as zonas com problemas através da identificação das regiões ou pontos onde a temperatura está alterada em relação a um padrão pré-estabelecido (mais quentes ou mais frias) (Scheffer & Girdhar, 2004).

Hoje em dia, existem inúmeros equipamentos de medição, que permitem a detecção de pequenas variações de temperatura quando comparadas com as condições padrão (Randall, 2011).

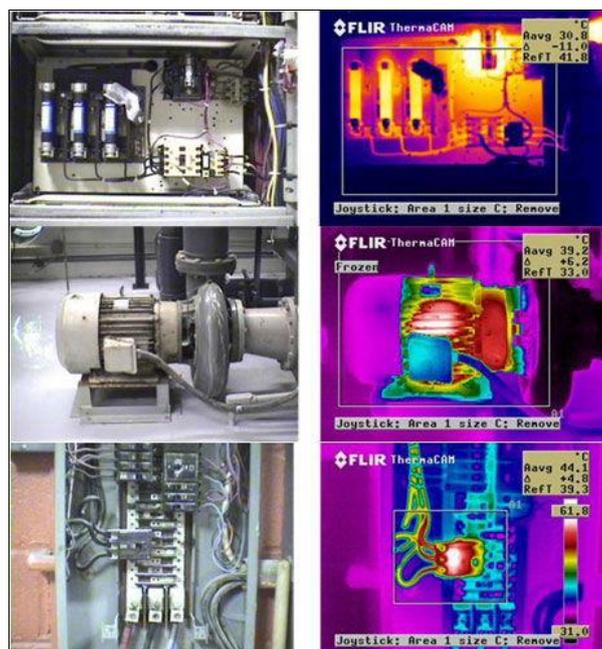


Figura 3.2 - Imagens obtida através de uma câmara termográfica (FLIR Systems, Inc, 2014).

3.4.4 Análise dos parâmetros de desempenho

Em determinados equipamentos, a análise de parâmetros de desempenho é uma forma bastante eficaz de verificar se este está a funcionar correctamente (Randall, 2011). Esta técnica baseia-se na recolha de dados relativos a parâmetros de funcionamento do equipamento (compressão, temperaturas, etc.) e no cálculo do rendimento actual do equipamento a partir desses parâmetros. O resultado é comparado com o rendimento original do equipamento, e desta forma verifica-se se existe alguma anomalia (Mobley, Higgins, & Wikoff, 2008).

3.4.5 Líquidos penetrantes

Este método é muito utilizado na detecção de fissuras, principalmente em materiais não magnéticos como o alumínio, magnésio, aços, vidro e plásticos. A técnica consiste em fazer penetrar um líquido (denominado de penetrante) na fissura existente, o qual através do fenómeno de capilaridade penetra na descontinuidade. Seguidamente remove-se o excesso de penetrante da superfície (a remoção deve ser feita com líquidos de remoção apropriados) e posteriormente coloca-se o revelador (geralmente é um pó fino branco). O revelador absorve o penetrante das descontinuidades, revelando-as (Agency, 2000).

A avaliação dos resultados obtidos deve ser feita sob boas condições de luminosidade (se o penetrante for do tipo visível) ou sob luz negra (caso o penetrante seja fluorescente).

A última etapa passa pela limpeza de todos os resíduos de produto, uma vez que estes podem interferir em etapas posteriores de trabalho da peça.

Este método apresenta uma grande simplicidade, quer no que toca à execução quer na análise dos resultados (apesar de exigir grande rigor na execução do procedimento). As principais desvantagens prendem-se com o facto de somente as descontinuidades superficiais serem detectadas e de não poder ser aplicado em superfícies porosas ou absorventes, já que não seria possível a total remoção do penetrante (Agency, 2000).

3.4.6 Análise de Fluidos

A análise de fluidos é a área que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação de superfícies sólidas em contacto, sejam elas fixas ou móveis. Existem várias técnicas de análise de fluidos que podem ser utilizadas no controlo de condição, nomeadamente a análise de óleos lubrificantes e análise de partículas de desgaste (Mobley R. K., 2002)

- **Análise de óleos lubrificantes**

Análise de óleos lubrificantes, como o nome indica, é uma técnica de análise que determina a condição dos óleos lubrificantes usados em equipamentos mecânicos e eléctricos. Através desta técnica é possível identificar as condições do óleo, isto é, verificar se este mantém as suas propriedades físico-químicas (Tsang, 1995).

A análise às propriedades físico-químicas deve ser efectuada de forma periódica em intervalos de tempo pré-estabelecidos. Os principais parâmetros testados nas amostras são: viscosidade, contaminação (por exemplo por água ou líquidos refrigeradores), teor de sólidos, oxidação, ponto de inflamação, bem como o número total de ácido (TAN) ou base (TBN) existente no óleo (Mobley, Higgins, & Wikoff, 2008).

- **Análise de partículas de desgaste**

Enquanto a análise das propriedades físico-químicas dos óleos lubrificantes verifica o estado desses mesmos óleos, a análise das partículas existentes nesses óleos, permite a verificação da condição da máquina. Em termos simples, o estado do equipamento é conhecido analisando a quantidade, composição e tamanho das partículas no óleo (Mobley R. K., 2002).

Existem dois métodos de estudo das partículas de desgaste, a espectrometria e a ferrografia. O primeiro método usa filtros graduados para separar os sólidos em tamanhos. Esta técnica apresenta algumas limitações nomeadamente o facto de só considerar partículas de 10 µm ou menos (contaminantes de tamanho superior são ignorados). O segundo método, a ferrografia, separa as partículas de desgaste utilizando um íman. A limitação desta técnica prende-se com o facto de apenas considerar as partículas magnéticas (Mobley R. K., 2002).

A análise de partículas de desgaste é uma excelente ferramenta de detecção de falhas. No entanto, como qualquer programa de manutenção condicionada, apresenta algumas limitações, que se prendem com o custo dos equipamentos de análise, a qualidade das amostras recolhidas e a interpretação dos resultados obtidos (Mobley R. K., 2002).

3.4.7 Análise de vibrações

Esta é sem dúvida uma das técnicas com maior expressão no que toca ao controlo de condição de máquinas rotativas. Permite detectar, prematuramente, anomalias em rolamentos, desalinhamentos, desequilíbrios, folgas, ressonância, entre muitas outras.

O princípio da análise de vibrações baseia-se na ideia de que, mesmo a mais pequena anomalia num sistema dinâmico, causa variações na intensidade das vibrações desse sistema (Gonçalves, Cunha, & Lago, 2007).

Este método consiste na recolha de dados de vibrações, medidos em vários pontos do equipamento (sem interromper o seu normal funcionamento) e na posterior comparação destes valores, com valores de referência (normalmente constam em normas ou nos manuais dos equipamentos) e que caracterizam o equipamento quando este está em boas condições. A detecção de desvios (através dessa comparação de valores), isto é, verificação de variações em frequência e/ou em amplitude sugere a presença de anomalias.

As técnicas de análise de vibrações estão bem desenvolvidas e vão desde métodos mais simples (medição dos valores globais das amplitudes de vibração) até aos mais complexos (correlações e espectros de correlações). Uns permitem a detecção da anomalia, outros vão mais longe e permitem diagnosticar o componente responsável por essas falhas.

Para a aplicação deste método, são necessárias pessoas com formação, tanto na fase da recolha dos dados como na fase de análise dos mesmos.

Como todas as técnicas de controlo de condição, esta também apresenta algumas limitações, como por exemplo, o facto de as medições poderem ser afectadas por outras fontes de vibração na máquina investigada, a dificuldade da interpretação dos sinais, bem como o facto de um aumento na sensibilidade do ensaio muitas vezes levar ao aumento de falsos alarmes.

Será feita uma abordagem mais aprofundada desta técnica no capítulo 4, uma vez que também será usada no presente estudo.

3.5 Vantagens obtidas com um programa de Controlo de Condição

No que se refere à segurança, as técnicas de controlo de condição permitem a redução dos danos assim como dos acidentes pessoais causados por avarias de uma máquina ou equipamento. A análise de tendências que pode ser efectuada com estes tipos de técnicas permite a determinação da melhor altura para a paragem da máquina/equipamento e é especialmente útil nos casos em que não são admissíveis paragens instantâneas. Quando são permitidas paragens instantâneas a condição da máquina/equipamento pode ser indicada através de alarmes.

Como resultado final do controlo de condição obtém-se um aumento da fiabilidade e da disponibilidade, ou seja, mais tempo de funcionamento. A monitorização das tendências permite programar, de acordo com o planeamento da produção, as paragens da máquina/equipamento para acções de manutenção e evitar perdas consequentes de paragens inesperadas. Permite ainda a paragem na altura devida, evitando uma maior destruição da máquina/equipamento ou tempos de reparação mais elevados, e possibilita uma equipa de manutenção esteja preparada para actuar logo que esta entre em más condições de funcionamento.

A verificação da condição permite pois maximizar o tempo planeado entre inspecções, reduzir o tempo de inspecção depois de uma paragem por avaria da máquina/equipamento e iniciar as acções de manutenção.

Outra vantagem é o aumento da taxa de produção, dado que a verificação da condição permite, quando eficiente, que as máquinas/equipamentos funcionem no seu máximo rendimento e velocidade. Por outro lado, pode detectar reduções na eficiência ou consumos de energia exagerados.

Consegue-se ainda usando o controlo de condição, de uma forma genérica aumentar a qualidade do produto fabricado ou do serviço prestado. Uma análise de tendências permite planear à priori eventuais paragens da produção, de maneira a evitar atrasos

para os clientes e a empresa ficar “mal vista” perante os clientes. A verificação da condição da máquina/equipamento é também uma forma de controlar a quantidade de produtos defeituosos de produção, quando estes são causados por avarias.

3.6 Desafios do Controlo de Condição

O desafio do controlo de condição passa pela integração de tecnologias e sistemas, pelo aumento da utilização de sistemas de diagnóstico automatizados e pela integração do controlo de condição e da monitorização de processos.

A maioria dos sistemas de monitorização disponíveis no mercado, já possibilita o manuseamento de dados provenientes de diversas tecnologias, por exemplo, permitem a comparação de curvas de tendência de contagem de partículas com a temperatura dos rolamentos bem como com os níveis de vibrações, tudo isto no mesmo gráfico.

A exigência, no que toca às capacidades dos técnicos e analistas, também se torna cada vez maior com o evoluir deste conceito, isto porque, não é possível obter uma imagem global do sistema a partir de uma única tecnologia, o que obriga a que os profissionais que avaliam o estado de condição dos equipamentos sejam multifacetados e não apenas especialistas numa área.

A internet também assume um papel importante quando se fala no futuro do controlo de condição. Hoje em dia há sistemas capazes de gerar e-mails, ou até mesmo web sites, permitindo aos utilizadores aceder a uma vasta quantidade de informação apenas com um simples browser.

4. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

4.1 Introdução

A análise de vibrações é uma técnica integrada num grande e variado número de áreas afectas à manutenção condicionada. Devido a este carácter interdisciplinar, esta área proporciona, a quem nela trabalha, novos e verdadeiros desafios todos os dias. É uma área em que a aprendizagem é constante, e por tudo isto, impõe grande empenho a quem quer tornar-se especialista (Brandt, 2011).

Este estudo não pretende ser exaustivo na área das vibrações, mas sim, estudar o que se pode concluir sobre a condição de uma máquina/equipamento a partir de medições de ultra-sons correlacionados com as medições de vibrações, de forma a confrontar os resultados obtidos e assim ter maior capacidade de diagnóstico e decisão.

Apesar do estudo aprofundado das vibrações estar fora do âmbito deste trabalho, torna-se pertinente apresentar alguns conceitos fundamentais.

4.2 Conceitos básicos sobre vibrações

A vibração consiste no movimento oscilatório em torno de uma posição em repouso. Esta manifesta-se sempre que ocorra uma força de excitação dinâmica, interna ou externa. A amplitude de vibração é função da intensidade da força de excitação, da massa e rigidez do sistema e do amortecimento do sistema.

A Figura 4.1 representa esse movimento oscilatório, provocado pela compressão e alongamento cíclico de uma mola quando se desloca a massa (bloco) para a esquerda ou para a direita, respectivamente.

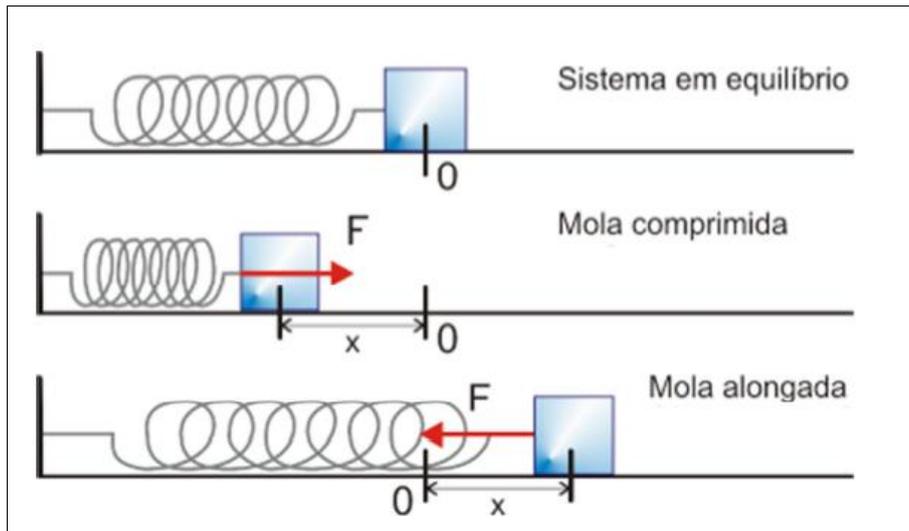


Figura 4.1 – Sistema massa mola.

A vibração necessita portanto de uma força que coloque a massa em movimento. Neste caso é necessário uma força que desloque a massa para a esquerda (uma distancia x), comprimindo a mola, que posteriormente fará o movimento contrário, passando pela posição de equilíbrio e atingindo a mesma distancia x para o lado direito, alongando a mola. Este movimento é repetido enquanto a força estiver a ser exercida na massa. O movimento harmónico simples descreve a vibração e pode ilustrar-se em termos gráficos pela Figura 4.2.

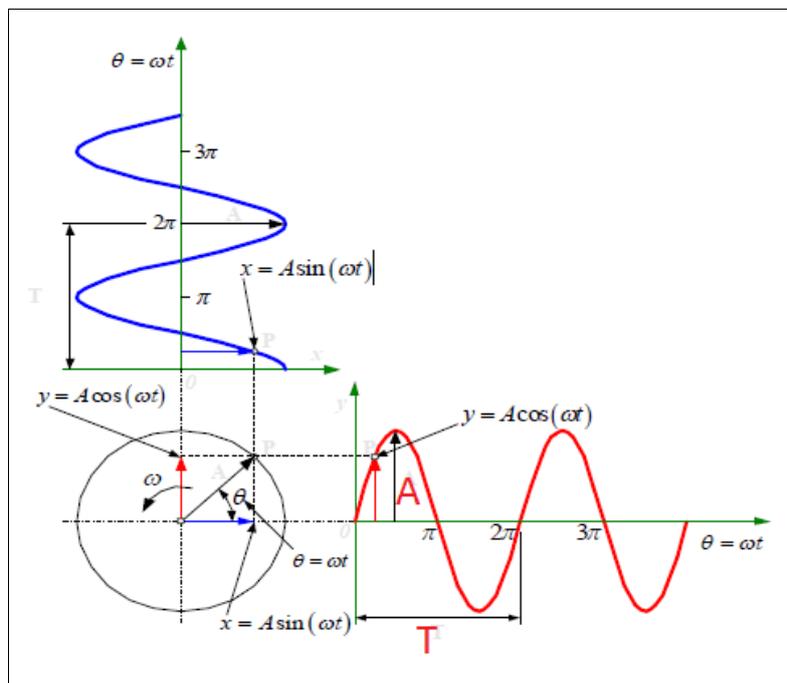


Figura 4.2 – Movimento harmónico simples, adaptado (Sequeira, 2012).

Na Figura 4.2, estão ainda representados dois conceitos importantes no que toca à compreensão das vibrações, sendo eles o período (T) e a amplitude (A).

O **período** pode ser definido como o tempo que é necessário para completar um ciclo, sendo dado pelo inverso da frequência ($T = \frac{1}{f}$).

A **amplitude** indica a severidade da vibração, isto é, quanto maior a amplitude maior a vibração. Esta pode ser expressa em valor pico a pico (p-p), valor de pico (p), valor médio e em valor eficaz (RMS), como se indica na Figura 4.3.

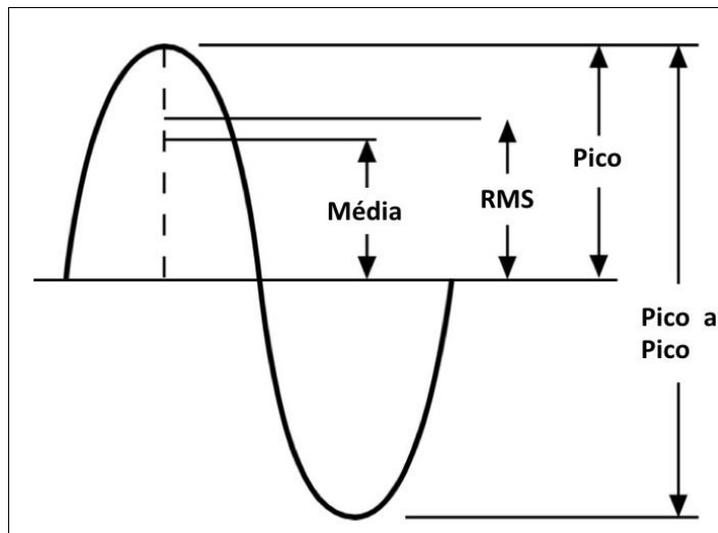


Figura 4.3 - Formas de representar a amplitude.

O **valor pico a pico**, é a distância compreendida entre o pico máximo e o pico mínimo e fornece a informação da amplitude máxima da onda (Mobius Institute, 2005).

A **amplitude pico**, é o valor desde zero ao pico máximo ou ao pico mínimo, consoante aquele que seja maior. Na onda ilustrada na figura 4.3 (sinusoidal), essa distância é igual nos dois casos, no entanto isso nem sempre se verifica, isto é, o sinal máximo pode ser maior ou menor que o sinal mínimo.

O **valor médio** é definido como sendo o valor médio dos valores absolutos da forma de onda, sendo esta medida raramente utilizada.

O **valor RMS** (Valor eficaz), é o valor mais relevante para definir a amplitude de vibração, uma vez que tem em conta a evolução do sinal no tempo e, por outro lado, encontra-se directamente relacionado com a energia contida na vibração, e, como tal,

consegue exprimir a capacidade destrutiva do sinal vibratório. Este termo é muito utilizado quando as vibrações são aleatórias ou consistem num número de vibrações sinusoidais com diferentes frequências. Para um movimento harmónico, o valor RMS é $0.707 \times$ Pico.

Para se proceder ao cálculo do valor de amplitude RMS, temos que conhecer o período de amostragem do sinal recolhido num determinado tempo e número de pontos (N), e pode ser calculado através da seguinte fórmula:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

O intervalo de tempo entre cada leitura do equipamento analisador depende do número de pontos adquiridos.

A amplitude pode ser expressa em várias medidas (Mobius Institute, 2005), como se refere na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Unidades de vibração.

| | |
|---------------------|----------------------|
| Deslocamento | m, mm, μm |
| Velocidade | m/s, mm/s |
| Aceleração | m/s^2 |

Outro conceito importante é a frequência, que se define pelo número de vezes que ocorre o movimento completo em determinado tempo, sendo geralmente dada em ciclos por minuto (CPM) ou ciclos por segundo (Hz).

A recolha de vibrações pode ser feita em diferentes unidades como se referiu anteriormente, no entanto a escolha dessas unidades não é aleatória, estando relacionada com a velocidade de rotação da máquina, seguindo-se para isso o critério apresentado na Tabela 4.2 (Mobius Institute, 2005).

Tabela 4.2 - Unidade de vibração para cada gama de velocidade de rotação da máquina.

| | |
|----------------------------|--------------|
| <1000 RPM | Deslocamento |
| 1000 RPM e 6000 RPM | Velocidade |
| > 10000RPM | Aceleração |

4.3 Tipos de vibrações

Sob o ponto de vista físico, as vibrações podem classificar-se como:



Figura 4.4 – Esquema de classificação dos tipos de vibrações.

Estacionárias ou contínuas: Duram mais que o intervalo de tempo da aquisição, ou seja são constantes e quando se faz uma aquisição apenas se recolhe amostra, são as mais usuais em máquinas rotativas. Estas dividem-se em aleatórias e determinísticas.

Aleatórias: Que têm por base fenómenos estocásticos quando somente as médias estatísticas (Média, variância, correlação) são constantes, exemplo deste tipo de vibração são as cavitações em máquinas hidráulicas.

Determinista: Quando é previsível a posição de um ponto para os vários instantes de tempo, ou seja, a cada ciclo dá-se a repetição dos fenómenos. Estas podem ser periódicas ou quase periódicas. No caso de serem periódicas, todas estas frequências discretas são múltiplas de determinada frequência fundamental. Nos sinais "quase periódicos", as frequências das diferentes sinusoides não se relacionam harmonicamente.

Sinais não estacionários: Significam que apresentam descontinuidade no tempo. Podem ser contínuas quando variam constantemente no tempo, por exemplo, a fala, ou transientes em que têm uma duração muito curta, por exemplo, o arranque de uma máquina ou um choque.

4.4 Técnicas de análise de vibrações

Duas das técnicas de monitorização de vibrações vulgarmente utilizadas são a monitorização do nível global de vibração e a análise espectral (análise em frequência).

4.4.1 Monitorização do nível global de vibração

A análise de vibrações feita pelo nível global (que representa o valor eficaz do sinal, RMS) é bastante utilizada, apresentando no entanto algumas limitações, uma vez que a sua análise permite apenas fazer o diagnóstico do equipamento, não possibilitando a descoberta da avaria em concreto. Esta é uma ferramenta basicamente de detecção.

Tal como já foi dito, as vibrações podem ser medidas em termos de aceleração, velocidade ou deslocamento, contudo, na monitorização do nível global de vibração é usual utilizar-se como medida a velocidade. A maior desvantagem desta técnica, é a necessidade de uma posterior análise para conseguir identificar o tipo de avaria em causa.

4.4.2 Análise espectral

Esta técnica utiliza normalmente um sistema de filtragem, possibilitando a selecção de partes do espectro de vibrações.

Nos equipamentos, a vibração pode ter várias fontes, como por exemplo, desequilíbrios, desalinhamentos, veios empenados, engrenagens desgastadas ou danificadas, aperto/fixação deficiente, atrito ou ressonância (Harris, 2002).

Recorrendo a este tipo de análise, é possível descobrir qual a fonte da avaria, indo muito para além da simples detecção, uma vez que as diferentes avarias manifestam-se de diferentes formas no espectro.

4.4.3 Amplitude da vibração em análise envelope

A técnica de análise envelope é baseada na desmodulação da amplitude, este processo consiste em eliminar as componentes de alta energia e baixa frequência, através de um filtro passa alta, amplificador, seguido de rectificador e filtro passa baixa.

O objectivo será eliminar as baixas frequências resultantes de outras fontes de vibração, como sejam desequilíbrios, desapertos, desalinhamentos e folgas. Estas frequências apresentam amplitudes muito superiores às amplitudes das frequências induzidas pelos defeitos em rolamentos.

Na medida convencional em aceleração, estas frequências, normalmente, de baixa amplitude, encontram-se submersas no ruído de fundo não sendo possível a sua identificação, mas, uma vez filtrado o sinal as componentes de alta-frequência passam por um circuito detector de pico a pico, o qual detecta e retêm as amplitudes pico a pico do sinal. Este processo também é conhecido por envolvente (Uys *et al.* (2007).

Cada fabricante usa um termo próprio para se referir a este tipo de análise. No caso da Emerson (fabricante do equipamento usado neste trabalho) a designação dada é “PeakVue”. A SKF designa por “SEE” e a IRD por gSE.

4.4.4 Equipamentos de medida

Para efectuar uma análise de vibrações, é necessário recorrer a equipamentos de medição capazes de medir o sinal vibratório. Estes acessórios são denominados por transdutores. Existem três tipos de transdutores, os de deslocamento, de velocidade e de aceleração (Scheffer & Girdhar, 2004).

Os transdutores para medir o deslocamento são transdutores relativos ou de proximidade enquanto os transdutores para medir velocidade e aceleração são os transdutores absolutos.

Os acelerómetros são os transdutores mais utilizados na medição de vibrações em equipamentos (sendo também o utilizado na recolha dos dados analisados na parte experimental desta dissertação), pelo que só estes serão abordados.

- **Sensores**

Os sensores fazem parte dos transdutores, sensor é o receptor do estímulo físico de entrada e responde com um sinal eléctrico possuindo uma relação conhecida com a primeira. Enquanto um transdutor é um dispositivo que converte energia de entrada em energia de saída.

Estes elementos são os que efectivamente estão ligados à máquina, onde se pretende saber a sua condição, são os responsáveis pela aquisição do sinal. Logo a sua importância é extrema, o que leva a ser necessário um grande cuidado na sua escolha. No caso das medições de vibrações estes podem ser de deslocamento, velocidade e aceleração, sendo o acelerómetro o mais utilizado devido à sua enorme versatilidade, enquanto outros sensores se resumem a aplicações muito específicas.

O sensor de deslocamento aplica-se no caso de ser uma instalação permanente, enquanto o sensor de velocidade é de aplicação mais restrita devido ao seu peso e fragilidade de componentes internos. Apesar de só possibilitar a recolha de frequências entre 10 e 1000 Hz, apresenta como grande vantagem o facto de ser auto-gerador, o que permite enviar o sinal eléctrico a grandes distâncias por cabo, permitindo trabalhar a altas temperaturas (Sequeira, 2005).

Antes de se efectuar qualquer análise, a vibração tem de ser convertida num sinal eléctrico, sendo essa tarefa desempenhada pelos transdutores. Estes convertem uma forma de energia (sinal vibratório mecânico existente na superfície da máquina), noutra forma de energia, normalmente em sinais eléctricos característicos da vibração do equipamento, cuja forma de onda está relacionada com o movimento mecânico. A relação entre a forma de onda mecânica e a forma da onda eléctrica, depende do tipo de transdutor utilizado na transformação de sinal e no tipo de tratamento dado a esse sinal pelo aparelho analisador. A complexidade da instrumentação de medida e as técnicas de análise podem variar substancialmente, mas em todos os casos, o transdutor de vibrações é o ponto mais crítico na cadeia de medição, porque sem um sinal rigoroso os resultados da análise não serão fiáveis (Sequeira, 2005).

Os transdutores são colocados em diversos pontos da máquina, para recolhas nas direcções radial e axial, podem ser utilizados de várias formas, através de base ponteira, base magnética, base roscada ou colada para um controlo permanente (Sequeira, A Análise de Vibrações como Ferramenta no Diagnóstico de Avarias em Máquinas Rotativas, 2005).

- **Acelerómetros**

O princípio de funcionamento dos acelerómetros assenta na criação de um sinal eléctrico, proporcional à vibração a que está sujeito (Scheffer & Girdhar, 2004).

Os acelerómetros têm uma vasta aplicação, desde colectores de dados a sistemas de monitorização permanentes, podendo ser utilizados em quase todos os ambientes e em quase todas as máquinas existentes no mercado.

Estes equipamentos são extremamente fáceis de instalar e são bastante resistentes. Têm ainda a possibilidade do sinal de saída ser em velocidade ou em deslocamento (através de integração interna).

Em operação, a caixa do acelerómetro acompanha a vibração do objecto vibrante e a massa, no seu interior, tende a manter-se estacionária no espaço. Com a massa estacionária e a caixa movendo-se com a vibração, o cristal piezoeléctrico é sujeito alternadamente à compressão e à extensão gerando assim uma carga alternadamente positiva e negativa.

A carga gerada pelo cristal é uma reprodução fiel do movimento da superfície na direcção do eixo sensível do acelerómetro. A carga é proporcional à força e, como é proporcional à aceleração, daí o nome acelerómetro.

Para os acelerómetros, a sensibilidade é directamente proporcional à sua massa. Por regra, quanto maior for o acelerómetro, maior a sua sensibilidade e menor a gama de frequência máxima utilizável (Sequeira, 2005).

Os acelerómetros devem trabalhar abaixo da sua primeira frequência natural. A sua sensibilidade é medida em milivolts por unidade de aceleração “g” e é aproximadamente constante até 1/5 da frequência de ressonância. Por esse motivo, é aconselhável o uso do acelerómetro até este limite superior de frequência (Sequeira, A Análise de Vibrações como Ferramenta no Diagnóstico de Avarias em Máquinas Rotativas, 2005).

- **Gama de frequências**

A reposta em frequência de um acelerómetro piezoeléctrico tem uma curva característica conforme apresentado na Figura 4.5. As medições deverão confinar-se à porção linear da curva de resposta, onde existe a garantia de que os valores medidos são, efectivamente, proporcionais à vibração, “aceleração” existente, a qual é limitada nas altas frequências pela ressonância da montagem do acelerómetro (Sequeira, 2005)

Na curva de resposta característica pode-se verificar uma banda de frequências onde a resposta é linear. Nas baixas frequências apresenta-se uma resposta não-linear ou seja, limitações nos circuitos electrónicos. Para as altas frequências temos uma resposta não-linear devido à influência da frequência de ressonância (Sequeira, 2005).

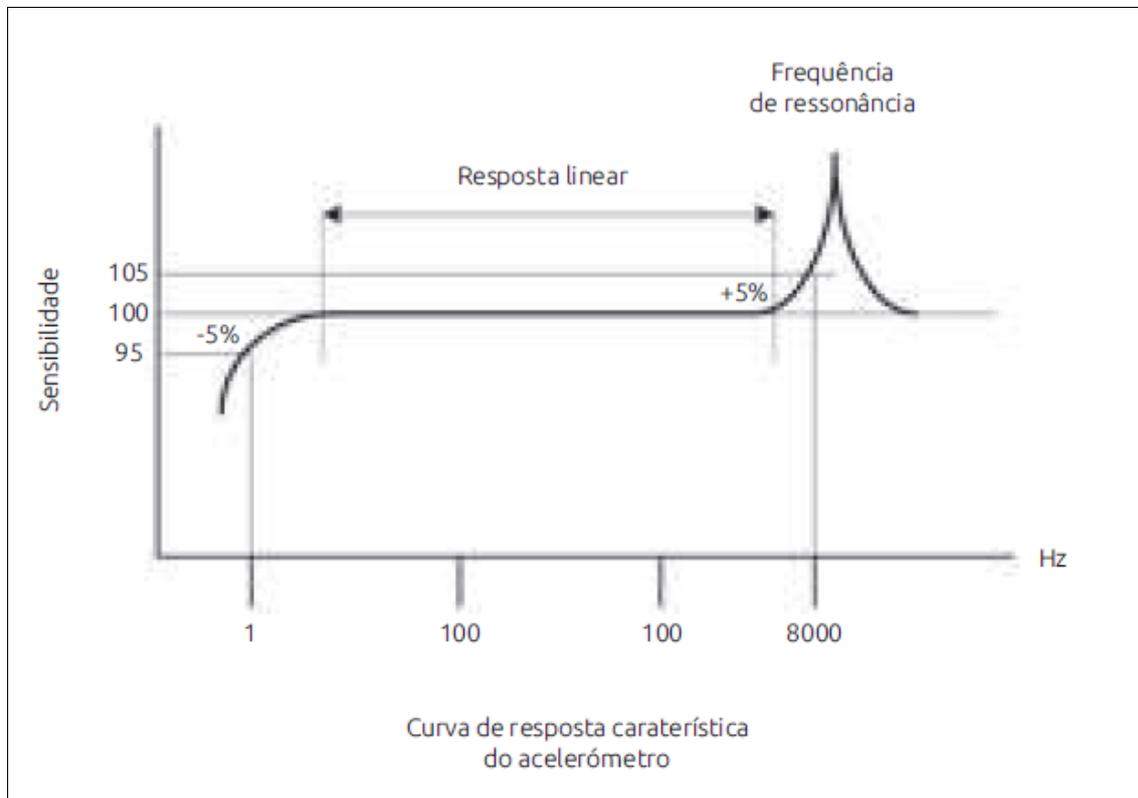


Figura 4.5 – Curva de resposta característica do acelerómetro (Sequeira, 2005).

Vantagens na utilização de acelerómetros

As principais vantagens associadas à utilização dos transdutores de aceleração prendem-se com os grandes intervalos dinâmicos e de frequência associados a estes equipamentos, a sua robustez reduzido atravancamento e reduzida massa. Sendo na maioria dos casos transdutores uniaxiais, podendo ser montados em qualquer direcção.

Seleccção dos pontos de colocação

A selecção dos pontos de medida para a recolha dos sinais vibratórios deve ser cuidadosamente estudada, tendo em conta os constrangimentos e características dos equipamentos, a fim de se impedirem possíveis erros de leitura, como por exemplo discontinuidades do material entre o ponto de leitura e a fonte das vibrações (Sequeira, 2005).

Para a análise da condição de funcionamento de qualquer equipamento, devem ser medidas e registadas as vibrações em cada uma das extremidades ou apoios. Nas três direcções do espaço; vertical, horizontal e axial, assim como a codificação dos vários pontos de leitura.

Existem vários tipos de montagem, tais como:

- Fixação aparafusada;
- Fixação por colagem com discos próprios;
- Fixação por base magnética;
- Utilização de ponteira.

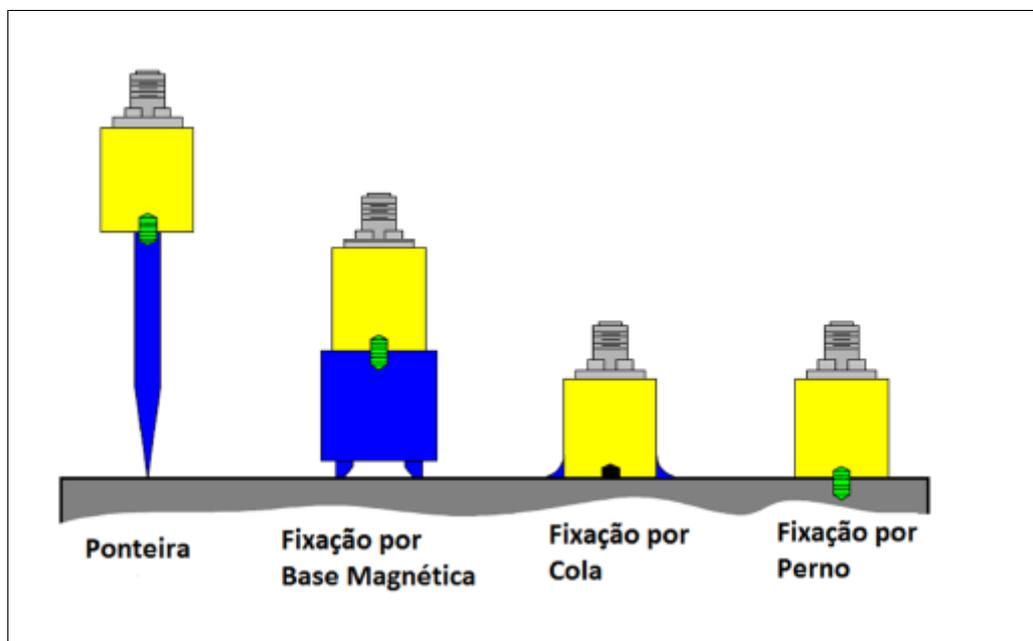


Figura 4.6 – Tipos de fixação do acelerómetro ((Roque, 2005).

A instalação do acelerómetro aparafusado é a melhor solução, mas nem sempre é possível este tipo de colocação devido às dificuldades de chegar aos pontos de medida. No entanto este é o melhor método de fixação, uma vez que tem apenas existe uma interface (acelerómetro-máquina).

A fixação por cola deve ser evitada, uma vez que o aumento da temperatura pode danificar o bloco adesivo. A fixação com base magnética é a técnica mais utilizada nas rotinas de controlo de condição. Este tipo de fixação é rápida, permite uma boa montagem e após a recolha do sinal torna-se simples retirar o transdutor e colocar em outra direcção de medição (Figura 4.7). A existência de duas interfaces (acelerómetro-

base magnética e base magnética-máquina) traduz-se em alguma perda de sinal, que pode ser minimizada com a lubrificação das superfícies de contacto.



Figura 4.7 – Exemplo de fixação com base magnética em motor eléctrico.

O uso de ponteira deve ser evitada, sempre que possível, pois é difícil garantir que se exerça a mesma força de contacto em todas as leituras, além de apresentar fraca transmissibilidade.

Seja qual for o método de fixação escolhido para efectuar as medições com o acelerómetro, serão provocadas alterações na resposta obtida, uma vez que a introdução, no sistema, de peças ou interfaces contribuem para essa diminuição de precisão nos resultados obtidos.

Os métodos escolhidos têm como consequências, a redução da frequência de ressonância do conjunto (fixação mais acelerómetro).

Segundo a Figura 4.8 o melhor método de fixação para medir é o que utiliza o perno roscado, a ser evitado temos a ponteira. Mas, mais uma vez, a escolha também irá depender do equipamento, ou dos conjuntos de equipamentos a medir.

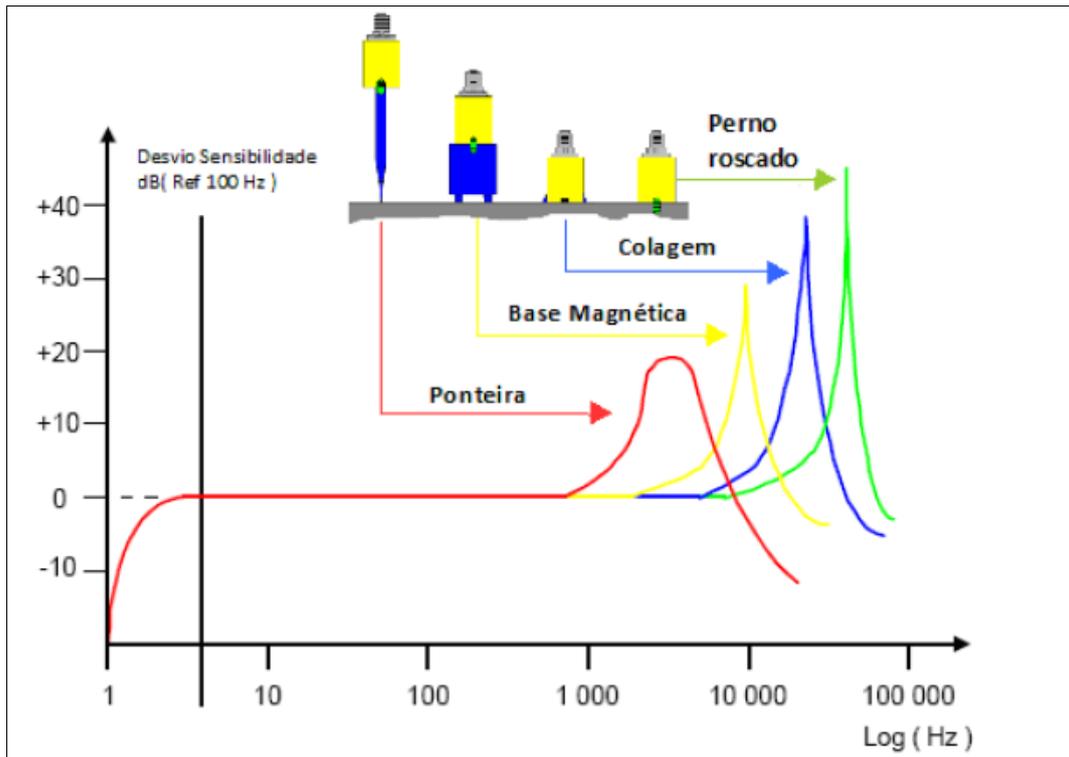


Figura 4.8 – Frequência em função da fixação (Roque, 2006).

4.4.5 Detecção de defeitos em rolamentos

4.4.5.1 Introdução

Os rolamentos estão entre os componentes mais importantes da grande maioria das máquinas sendo que as suas especificações de tempo de vida útil e capacidade são muito rigorosas. Isto permite que se faça coincidir o tempo de vida do rolamento com o tempo de vida da máquina. O tempo de vida de um rolamento é definido como o número de rotações que pode fazer antes dos primeiros sinais de fadiga na forma de fendas (Sampaio, 2009). Estas fendas desenvolvem-se gradualmente até à superfície. Com a passagem dos elementos rolantes desprendem-se pequenos fragmentos, fenómeno conhecido como flaking ou spalling. O dano continuará a aumentar em extensão e eventualmente levará ao colapso do rolamento. Infelizmente grande parte dos rolamentos não atinge a vida prevista (Sampaio, 2009) sendo que:

- 10% - Atinge o tempo de vida útil previsto;
- 40% - Avaria por lubrificação deficiente;
- 30% - Avaria por montagem inadequada (desalinhamento ou enjambramento);

- 20% -Avaria por outras razões (sobrecarga, defeito de fabrico, deficiente conservação).

Segundo Roque *et al.* (2008) as frequências de defeito de um rolamento podem ser calculadas tendo em conta as velocidades relativas entre os vários elementos constituintes deste. No entanto, para se elaborar um diagnóstico eficaz, não se deve limitar a análise ao simples cálculo das frequências por aplicação directa das expressões matemáticas. Deve ter-se também presente a forma como o rolamento defeituoso gera essas frequências e os factores que permitem justificar a diferença entre as frequências teóricas calculadas e as medidas e emitidas pelo rolamento.

4.4.5.2 Cálculo das frequências de defeito

Nesta secção serão apresentadas as expressões matemáticas que permitem o cálculo das frequências de defeito de rolamentos. Essa apresentação tem por base o trabalho desenvolvido por Roque *et al.* (2008).

No espectro de frequências de um rolamento com defeito podem aparecer, para além da frequência de rotação do anel interno ou externo, as harmónicas da frequência de defeito e bandas laterais resultantes da modulação em amplitude, relacionada com frequência de rotação da gaiola ou com a frequência de rotação do anel interno ou externo. Para calcular as frequências de defeito de um rolamento tenha-se em atenção a Figura 4.9 e 4.10.

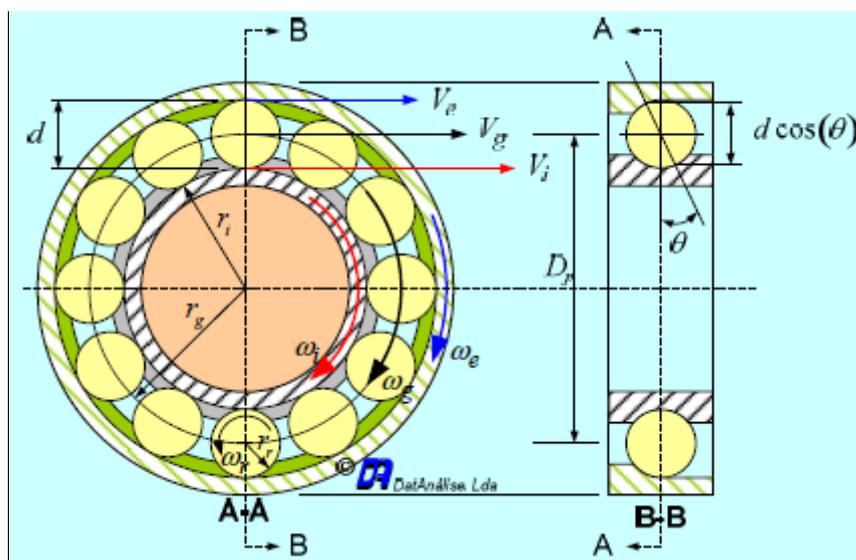


Figura 4.9 - Geometria do rolamento (Roque *et al.* (2008).

A velocidade angular da gaiola vem dada por:

$$\omega_g = \frac{Vg}{r_g} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

De forma idêntica vem para a velocidade angular da pista externa,

$$\omega_e = \frac{(Ve)}{r_{re}} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

e ainda, para a velocidade angular da pista interna,

$$\omega_i = \frac{(Vi)}{r_{ri}} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Considerando que não há escorregamento entre os elementos em movimento a velocidade linear da gaiola é dada por:

$$V_g = \frac{(Vi + Ve)}{2} = \frac{(\omega_i r_{ig} + \omega_e r_e)}{2} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

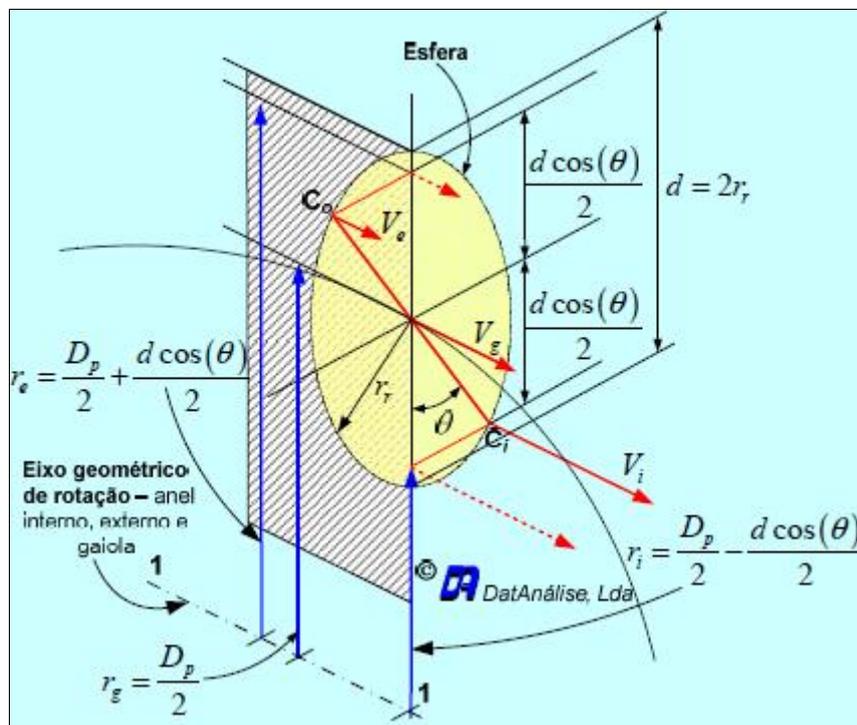


Figura 4.10 - Geometria do rolamento - ângulo de contacto θ (Roque *et al.* (2008)).

Da figura 4.10 retira-se

$$r_g = \frac{(Dp)}{2} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$r_i = \frac{(Dp)}{2} - \frac{d \cos \theta}{2} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$r_e = \frac{(Dp)}{2} + \frac{d \cos \theta}{2} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$r_r = \frac{d}{2} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Substituindo (4.5) em (4.2) e atendendo às relações geométricas (4.6), (4.7) e (4.8) vem para a velocidade angular da gaiola,

$$\omega_g = \frac{1}{2} \left[\omega_i \left(1 - \frac{d \cos \theta}{Dp} \right) + \omega_e \left(1 + \frac{d \cos \theta}{Dp} \right) \right] \quad (\text{Eq. 4.10})$$

A expressão (4.10) representa na realidade a frequência de defeito da gaiola FTF que pode ser expressa em Hz,

$$\omega_g = 2 \pi f_g \quad (\text{Eq. 4.11})$$

$$FTF = f_g = \frac{1}{2} \left[f_i \left(1 - \frac{d \cos \theta}{Dp} \right) + f_e \left(1 + \frac{d \cos \theta}{Dp} \right) \right]$$

Por outras palavras, a expressão (4.11) representa a frequência de rotação da gaiola e por este facto o seu aparecimento no espectro de frequência está relacionado com desequilíbrio do conjunto rotativo – gaiola e elementos rolantes, devido a desgaste ou folgas acentuados. O seu aparecimento pode ainda estar associado à modelação em amplitude devido a defeitos na pista interna e externa.

A frequência de defeito BPFO é definida como frequência com que as esferas ou rolos passam por um defeito na pista externa e pode ser determinada multiplicando o número de elementos rolantes pela velocidade angular relativa entre a gaiola e a pista externa.

Assim,

$$BPFO = N(\omega_g - \omega_e) \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Substituindo (4.10) em (4.12),

$$BPFO = N \left\{ \frac{1}{2} \left[f_i \left(1 - \frac{d \cos \theta}{Dp} \right) + f_e \left(1 + \frac{d \cos \theta}{Dp} \right) \right] - f_e \right\} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

e após alguma manipulação matemática

$$BPFO = \frac{N}{2} (f_i - f_e) \left(1 - \frac{d \cos \theta}{Dp} \right) \quad (\text{Eq. 4.14})$$

De forma análoga a frequência de defeito BRFI é calculada multiplicando o número de esferas ou rolos pela velocidade angular relativa entre a pista interior e a gaiola, ou seja,

$$BRFI = N(\omega_i - \omega_g) \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Substituindo (4.10) em (4.15) e após simplificação vem para a frequência de defeito na pista interior,

$$BRFI = \frac{N}{2} (f_i - f_e) \left[1 + \left(\frac{d \cos \theta}{Dp} \right) \right] \quad (\text{Eq. 4.16})$$

A frequência de defeito BSF é definida como a frequência de rotação do elemento rolante, esfera ou rolo, sobre o seu próprio centro. A velocidade angular do rolo ou esfera em torno do seu centro é,

$$\omega_r = \frac{Vr}{r_r} \quad (\text{Eq. 4.17})$$

Considerando que só há rotação pura e que não ocorre escorregamento a velocidade tangencial da esfera ou rolo no ponto de contacto com a pista interna é igual a

$$Vr = (\omega_r - \omega_g)r_i \quad (\text{Eq. 4.18})$$

Substituindo (4.18) em (4.17) vem,

$$\omega_r = \frac{(\omega_i - \omega_g)r_i}{r_r} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

Substituindo (4.7), (4.9) e (4.10) em (4.19) obtém-se para a frequência de defeito BSF,

$$BSF = fr = \frac{Dp}{2d}(fi - fe) \left[1 - \left(\frac{d \cos \alpha}{Dp} \right)^2 \right] \quad (\text{Eq. 4.20})$$

No caso dos rolamentos de rolos é frequente o aparecimento da frequência $2xBSF$ pois são gerados impulsos na passagem do defeito pela pista interna e pela pista externa durante uma rotação do rolo.

As frequências de defeitos calculadas são gerais pois tiveram em consideração não só a velocidade de rotação do anel interno como também a velocidade de rotação do anel externo. No entanto na grande maioria soluções construtivas, o anel externo encontra-se fixo e as expressões vêm simplificadas.

- **Expressões simplificadas**

Assim quando a anel exterior se encontra fixo as expressões reduzem-se a:

$$FTF = \frac{1}{2}(fi) \left(1 - \frac{d \cos \alpha}{Dp} \right) \quad (\text{Eq. 4.21})$$

$$BPFO = \frac{N}{2}(fi) \left(1 - \frac{d \cos \alpha}{Dp} \right) \quad (\text{Eq. 4.22})$$

$$BPFI = \frac{N}{2}(fi) \left(1 + \frac{d \cos \alpha}{Dp} \right) \quad (\text{Eq. 4.23})$$

$$BSF = \frac{Dp}{2d}(fi) \left[1 - \left(\frac{d \cos \alpha}{Dp} \right)^2 \right] \quad (\text{Eq. 4.24})$$

Por análise das expressões anteriores são válidas as seguintes relações,

$$BPFO = N(FTF) \quad (\text{Eq. 4.25})$$

$$BPFI = N(fi - FTF) \quad (\text{Eq. 4.26})$$

Para o cálculo das frequências de defeito é obrigatório conhecer as características geométricas do rolamento. Quando tal não for possível pode-se recorrer a expressões aproximadas.

- **Expressões aproximadas**

Quando o ângulo de contacto é desconhecido e os restantes elementos estão disponíveis é admissível aplicar as expressões (4.21 a 4.24) fazendo $\theta = 0$. Se em casos extremos não for possível obter dados suficientes para esse cálculo pode-se em alternativa aplicar as seguintes expressões:

$$FTF = 0.4fi \quad (\text{Eq. 4.27})$$

$$FTF = 0.4Nfi \quad (\text{Eq. 4.28})$$

$$FTF = 0.6Nfi \quad (\text{Eq. 4.29})$$

As expressões (4.27 a 4.29) baseiam-se no facto de, numa rotação completa do anel interno, cerca de 40% dos elementos rolantes passam por um defeito na pista externa e cerca de 60% dos elementos passam por um defeito na pista interna.

5. ULTRA-SONS PROPAGADOS NO AR E ESTRUTURAS

5.1 Introdução

A tecnologia de ultra-sons propagados no ar e estruturas, como parte integrante das tecnologias de manutenção condicionada, permite usar a um nível de alta eficiência o ouvido humano, para captar os sinais de ultra-sons que viajam através do ar ou estruturas. Esta tecnologia cada vez mais usada e de fácil integração nos programas de manutenção condicionada na indústria permitem obter informações dos sinais de alta frequência.

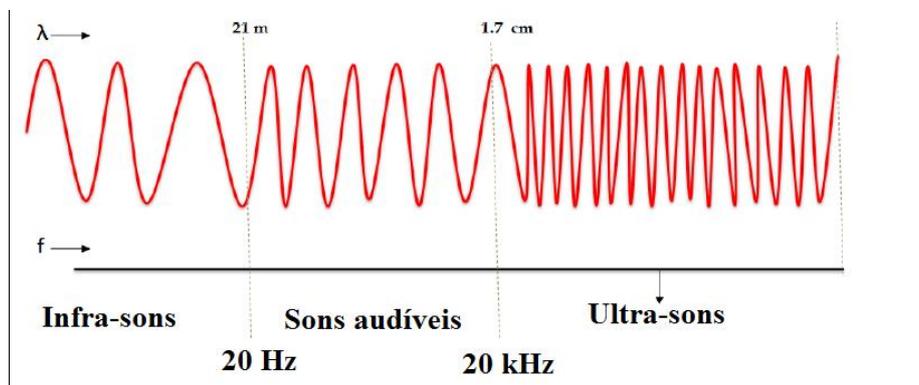


Figura 5.1 – Espectro sonoro.

Deve fazer parte de um programa de manutenção condicionada, várias fontes de informação que trabalhem de maneira eficiente, as quais devem fazer parte as técnicas de controlo de condição e de diagnóstico. Fazer um bom diagnóstico é de grande utilidade para evitar paragens inesperadas nos equipamentos críticos. Os ultra-sons captam os sons em frequências que seriam impossíveis de captar pelo ouvido humano (através do efeito heteródino, Figura 5.2), e permitem perceber de forma imediata uma série de anomalias, tanto ao nível de defeitos em equipamentos/máquinas, como em sistemas de fluxos de fluidos pressurizados, como ao nível da inspeção eléctrica, permitindo às empresas evitar desperdícios de tempo/produção em paragens não previstas, promovendo a eficiência energética e permitindo de forma directa a poupança energética e ambiental.

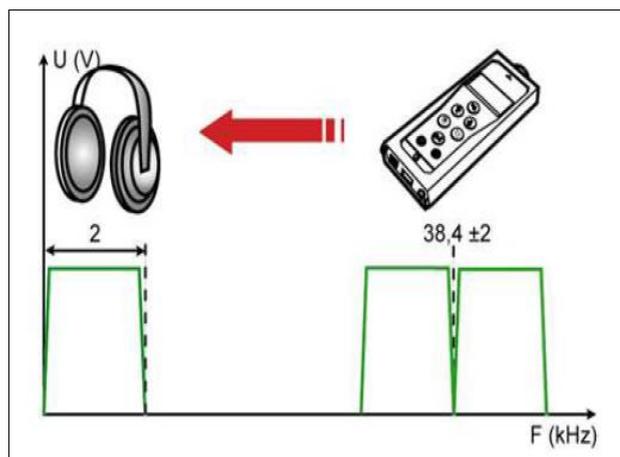


Figura 5.2 – Efeito heteódino (SDT, 2014).

5.1.1 Qualidade em inspeções de ultra-sons

Qualquer inspeção que mereça ser realizada merece ser realizada de maneira correcta. O tempo é muito valioso, bem como o equipamento e o ambiente que se está a monitorizar. O uso da tecnologia de ultra-sons propagados no ar deverá ser considerado como um processo controlado, o qual significa que a natureza da realização das inspeções de ultra-sons requer que sejam aplicadas medidas de controlo de qualidade. Estas medidas de controlo da qualidade são:

- **Procedimentos de inspeção:** Códigos, normas e especificações para inspeccionar o equipamento sujeito à medição e validar a sensibilidade do detector;
- **Crítérios de aceitação:** Para tomar decisões acerca de determinado equipamentos/máquina inspeccionado, os critérios de aceitação devem ser mensuráveis (por exemplo: rolamento a funcionar correctamente vs. rolamento com defeitos);
- **Validação da sensibilidade do equipamento de medição:** É recomendável que a validação da sensibilidade do equipamento de medição, seja realizada no início e no fim da inspeção. No caso de inspeções contínuas, a verificação da sensibilidade deverá ser efectuada no início, no meio e no final da inspeção;
- **Factores humanos:** Formação, experiencia, boas capacidades auditivas e capacidade física para realização das inspeções.

5.1.2 Procedimento de inspecção

O conteúdo dos procedimentos ou instruções dos processos controlados deveram focar-se no seguinte:

- Códigos, Normas e especificações aplicáveis à inspecção;
- Critérios de aceitação;
- Validação (calibração) do equipamento e da sensibilidade requerida;
- Requerimentos de qualificação e certificação para procedimentos, equipamentos e pessoal;
- Requerimentos físicos do pessoal de inspecção.

Os procedimentos de inspecção deverão ser revistos e aprovados por inspector com certificação de nível II em ultra-sons propagados no ar.

5.1.3 Qualificação e certificação de técnicos

A qualificação e certificação de técnicos credenciados para realização das inspecções de ultra-sons é feita normalmente pelas empresas fabricantes/representantes dos equipamentos (por exemplo, a UE Systems e SDT ultrasound solutions). A certificação é feita por níveis, existindo dois níveis de certificação: certificação nível I e certificação nível II.

5.1.4 Aplicações da tecnologia de ultra-sons

A inspecção por ultra-sons propagados no ar/estruturas pode ser utilizada em praticamente qualquer tipo de instalação e industria, e tem aplicação muito generalizada.

- **Química/Petroquímica:** fugas de pressão/ vácuo, monitorização de rolamentos, purgadores de vapor, válvulas, compressores, permutadores de calor, engrenagens, bombas (incluindo cavitação), motores alternativos, filtros de poluição, equipamentos eléctricos;
- **Gás/Distribuição de Gás:** compressores, análises de válvulas, detecção de fugas, monitorização de rolamentos;

- **Indústria da borracha/ pneus:** detecção de fugas, purgadores de vapor, válvulas, monitorização de rolamentos, equipamentos eléctricos, bombas e motores;
- **Produção e distribuição de energia:** fugas em condensadores, permutadores de calor, purgadores de vapor, válvulas, caldeiras, rolamentos, bombas, turbinas, arco eléctrico e efeito de coroa em equipamentos eléctricos, transformadores, isoladores;
- **Aviação/ indústria aeroespacial:** fugas de pressão em cabines, janelas da cabine do piloto, fugas no sistema de oxigénio, células de combustíveis, actuadores, válvulas hidráulicas, fugas em tubos de ar quente, fugas em sistemas de nitrogénio, rolamentos;
- **Instalações/edifícios e pisos:** rolamentos, unidades de tratamento de ar, bombas, motores, compressores, fugas de pressão, purgadores de vapor, válvulas, chillers, transformadores, interruptores, disjuntores, fugas em estruturas do edifício (infiltração de ar, águas, etc.);
- **Indústria em geral:** rolamentos, válvulas, purgadores de vapor, compressores, permutadores de calor, fugas de pressão/vácuo, caixas de engrenagens, condutas, filtros de poluição, arco eléctrico, arborescência e efeito de coroa em equipamentos eléctricos, caixas de união.

Outras aplicações: transporte, materiais e compostos, processamento de alimentos, tratamentos de águas residuais, marinha, indústria do têxtil, entre outras.

5.2 Inspeções de fugas

A determinação de quando e que tipo de fugas se devem procurar depende de muitas variáveis como os custos, a segurança, o desempenho, o impacto em produtos relacionados (qualidade), assim como na capacidade de reparar as fugas uma vez encontradas. As fugas ocorrem quando um fluxo de partículas se movem de um meio para outro, devido à pouca resistência que este oferece.

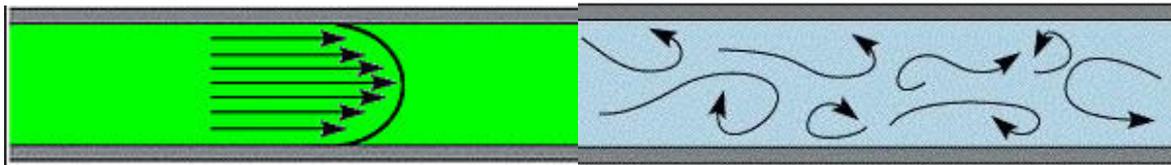
Os factores que influenciam a detecção de fugas são os seguintes: turbulência, forma do orifício, viscosidade do fluido, diferenças de pressão, ultra-sons de outras fontes, distância da fuga e acessibilidade à fuga.

5.2.1 Turbulência

Para detectar uma fuga usando a tecnologia de ultra-sons propagados no ar, a fuga deve apresentar certas características, tais como, turbulência para emitir o som ultra-sónico com qualidade. Alguns gases são menos densos que outros, em qualquer dos casos, estes tendem a fluir mais rápido através do orifício. Se os diferenciais de pressão entre a alta pressão e a baixa pressão são grandes devido às condições atmosféricas, a turbulência causada pela fuga será ainda maior. Um orifício grande por um lado produz mais turbulência que um orifício pequeno, mas em certas situações o contrário também é verdade. Um orifício irregular ou áspero usualmente produz mais turbulência que um orifício liso. Uma parede grossa tenderá a baixar algumas forças de pressão e reduzir os diferenciais de pressão mais que uma parede fina. Alguns materiais absorventes, como a borracha, produzem menos ultra-sons que materiais condutores como é o caso do aço inoxidável.

Existem muitas variáveis, que não permitem decidir com certeza, que uma fuga a determinada pressão e diâmetro produz ultra-sons detectáveis. Isto é especialmente correcto em fugas de baixo pressão.

Há dois tipos de escoamento, o escoamento laminar e o escoamento turbulento. O escoamento laminar é o tipo de escoamento onde existe um mínimo de agitação das várias camadas do fluido, em que este se move, em camadas sem que haja mistura destas e variação de velocidade. Ou seja, as partículas movem-se de forma ordenada, mantendo sempre a mesma posição relativa (ver Figura 5.3a). O escoamento turbulento (Figura 5.3 b), em contrapartida, é aquele que não segue uma linha de fluxo, aquele no qual as partículas apresentam movimento caótico macroscópico, isto é, a velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do conjunto ao fluido, as partículas do fluido descrevem trajectórias que variam de instante a instante.



a) Escoamento Laminar

b) Escoamento Turbulento

Figura 5.3 – Tipos de escoamento.

Quando se realiza uma inspeção de fugas usando o equipamento de ultra-sons, há limitações que dependem do tipo de fluido que os gera, sendo que só os escoamentos turbulentos são passíveis de ser detectados. Na Figura 5.4, são apresentadas diferentes tipos de fugas.



a) Fugas Pontuais



b) Fugas de membrana



c) Fugas entre uniões



d) Fugas em roscas

Figura 5.4 – Tipos de fugas.

5.2.2 Forma do orifício

Independente do tamanho do orifício, é importante recordar que um orifício liso não produz tanta turbulência como um irregular. Um orifício que tenha muitas arestas pode afectar o fluxo e produzir mais turbulência.



Figura 5.5 – Fuga em forma de orifício (UE Systems inc, 2007).

- **Fugas de membrana:** são fugas do tipo membrana que penetram através das paredes do reservatório. As fugas de membrana são praticamente impossíveis de resolver;
- **Fugas por orifícios:** podem permitir o fluxo de qualquer gás quando se criam os diferenciais de pressão. O tamanho de abertura é um factor que influencia a detecção das fugas. As fugas por orifícios de alta pressão são detectáveis por ultra-sons a distâncias consideráveis.

Deverá ter-se especial atenção ao recipiente com um orifício de forma irregular. Um orifício de forma irregular tem a probabilidade de aumentar de tamanho, e quanto maior for a pressão, maior será a probabilidade disto acontecer. Factores como as condições de serviço, a forma do recipiente, seu tamanho, a espessura, o material e método de fabricação, influenciam esta ocorrência.

5.2.3 Diferenças de pressão

O diferencial de pressão é um aspecto muito importante quando se realizam a grande maioria das inspecções de fugas.

5.2.4 Viscosidade do fluido

A viscosidade de um fluido define-se como a sua resistência ao fluir, uma medida do coeficiente de fricção do fluido. Por exemplo, a viscosidade da água é superior à do vapor, logo apresenta mais resistência a fluir.

5.2.5 Distância da Fuga

Outro factor que influencia a detecção das fugas é a distância a que a fuga se encontra. A intensidade do sinal dos ultra-sons reduz-se enquanto a distância da fonte aumenta.

5.2.6 Acessibilidade da Fuga

Obviamente, se não se pode estar a uma distância suficientemente próxima para detecção da fuga, não se pode detectar. É importante que a fuga esteja acessível, e quanto mais próximo o inspector possa chegar junto da mesma, melhor será a detecção e avaliação. Se a fuga estiver enterrada atrás de algumas estruturas, esta tende a reflectir-se em várias estruturas. O ultra-som proveniente da fuga é enviado então de outras direcções, reflectindo-se de obstáculo em obstáculo o que levará à dificuldade da sua localização precisa. Em alguns casos, os ultra-sons podem chocar com materiais absorventes das ondas sonoras, e quanto maior for a distância que a fuga viaje, mais atenuado e débil será o seu sinal. Desta forma, é importante, que o inspector se aproxime da fuga, removendo todos os obstáculos que possam interferir para uma leitura correcta. Para ajudar nesta tarefa, os equipamentos de ultra-sons vêm providos de outros tipos de sensores, como seja a guia de onda, o prato parabólico e as sondas flexíveis.

5.3 Técnica para detecção de fugas

À medida que um gás circula por um orifício de fuga, é gerado um caudal turbulento com componentes de alta frequência detectáveis. Ao rastrear a área de teste de uma fuga pode ser ouvida através dos auscultadores quando for assinalado um som repentino e intenso no visor/medidor. Quanto mais próximo da fuga estiver o instrumento, mais alto será o som repentino e intenso e mais alta será a leitura. Se o ruído ambiente for um problema, pode ser utilizada uma sonda de borracha para limitar o campo de recepção do instrumento e para proteger o mesmo contra ultra-sons em conflito. Além disso, a sintonização de frequência (disponível na maior parte dos modelos) reduz drasticamente a interferência de ruídos de fundo para facilitar a detecção de fugas ultra-sónicas. Seguem-se algumas técnicas de detecção.

5.3.1 Ajuste da frequência (20kHz-100kHz)

Utilizar o ajuste de frequência em situações onde o som ou o sinal seja difícil de isolar. O ajuste de frequência permite ao operador seleccionar uma frequência específica para cada problema enquanto reduz a interferência de sinais ultra-sónicos que não interessam. Esta característica vê-se afectada por diferentes tipos de origem das fugas, como sejam fugas subterrâneas ou fugas por detrás das paredes.

Ajustando a frequência de 20 a 100 kHz, o operador será capaz de reconhecer facilmente fugas assim como sons de líquidos. A maioria da instrumentação de ultra-sons têm uma resposta de pico aos 40 kHz para o módulo de varrimento e 20 a 30 kHz no módulo de contacto (estetoscópio) como se verá mais adiante na secção 5.7.

5.3.2 Acessórios apropriados para detecção de fugas

As fugas variam e nem todas podem ser facilmente detectadas com o módulo de varrimento. Por esse motivo existem módulos especializados que se podem utilizar para detecção de fugas em situações especiais, que são apresentados nos pontos seguintes.

- **Módulo de aproximação:** as fugas de baixo nível são emissoras de ultra-sons de baixa amplitude. Os inspectores de ultra-sons propagados no ar podem utilizar equipamentos especiais para melhorar a qualidade do som de essas fugas difíceis. Simplesmente varrer próximo da superfície da área onde se suspeita que se encontra a fuga com o módulo de foco e determinar com precisão a localização da fuga.



Figura 5.6 - Módulo de varrimento/aproximação.

- **Sensor parabólico:** Estes módulos especialmente desenhados permitem detectar as fugas a uma grande distância. Um concentrador de ondas ultra-sónicas pode detectar uma fuga a uma maior distância que o módulo de longa distância. O

sensor parabólico é usado quando o inspector precisa de estar distante da fuga, como por exemplo, por motivos de segurança. Os sensores parabólicos duplicam e triplicam a distância de detecção dos equipamentos de ultra-sons e fornecem um feixe mais reduzido de cinco graus para indicar o lugar da fuga.



Figura 5.7 - Sensor parabólico.

- **Módulo de detecção ultra-sónica de longo alcance:** é um reflector ultra-sónico desenhado para melhorar os sinais de fuga gerada a uma grande distância. Este aumenta a escala de detecção do equipamento de ultra-sons por cima do módulo de varrimento para aproximadamente 2 vezes com o campo de detecção mais reduzido de dez graus.



Figura 5.8 - Módulo de detecção ultra-sónica de longo alcance.

- **Sondas flexíveis:** para fugas que sejam mais difíceis de alcançar, com ângulos difíceis ou quando os métodos de varrimento não são viáveis, pode-se utilizar as sondas flexíveis. Estas sondas são flexíveis e extensíveis o que permitem que então se chegue aos locais mais difíceis de inspeccionar.



Figura 5.9 - Sonda flexível.

- **Sonda de foco (borracha):** a sonda de foco está desenhada para se poder aproximar o mais possível à fuga, para que seja identificada de forma inequívoca. Esta ajuda a reduzir o ruído de ultra-sons provenientes de outras fontes que não interessam e também a reduzir o campo de recepção para ajudar a focar a área da fuga. Enquanto o técnico se aproxima da fuga, será capaz de identificar a fuga mediante um movimento de ida e volta, e quando for seguro de realizar, pode confirmar a fuga colocando a sonda de foco de borracha sobre o lugar da fuga. Esta confirmação é chamada o método de selagem.



Figura 5.10 - Sonda de foco (borracha).

5.3.3 Seleção do módulo adequado

- SCM – Módulo de varrimento, para varrimento normal;
- CFM – Módulo de aproximação, para fugas de pressão e vazio extremamente baixas;

- LRM – Módulo de longa distância, para grandes distâncias;
- UWC – Concentrador de onda ultra-sónicas, para distâncias extremamente grandes;
- FLX – Sondas Flexíveis ou extensíveis, para alcançar áreas de difícil acesso;
- Sonda de foco de borracha – Confirmação, bloqueio, medição.

5.3.4 Ensaio de pressão e vazio

Ao detectar os ultra-sons gerados por uma fuga, o equipamento de ultra-sons pode ser usado para localizar fugas em sistemas pressurizados independentemente do tipo de fluido, portanto a detecção de fugas com ultra-sons tem uma aplicação muito ampla. Isto é especialmente benéfico nas áreas onde haja saturação de gases, ou onde há uma grande variedade de gases em contentores pressurizados e onde existe o processo de vazio.

- **Ensaio de Pressão** (Figura 5.11): Os gases pressurizados movem-se através da área de fuga produzindo um fluxo turbulento reconhecível. Já que a turbulência é conhecida por parte do método de varrimento, os ultra-sons são mais fortes do que na inspeção do vazio. Por esta razão, o ensaio de pressão é muito assertivo para localizar as fugas do médio e baixo nível.

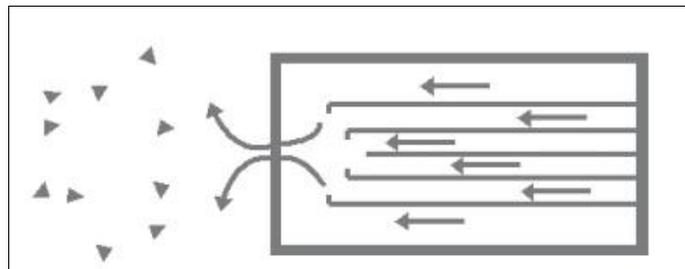


Figura 5.11 – Representação de uma fuga em pressão.

- **Ensaio de vazio** (Figura 5.12): Durante o ensaio de vazio, o fluxo de ar move-se da atmosfera para o vazio. Enquanto o faz, produz um fluxo turbulento principalmente do lado do vazio. Devido a que o aumento de turbulência está a ser gerado dentro do lado do vazio, o sinal de fuga tende a ser relativamente baixo. Por essa razão, é importante fazer o varrimento nesse lugar.

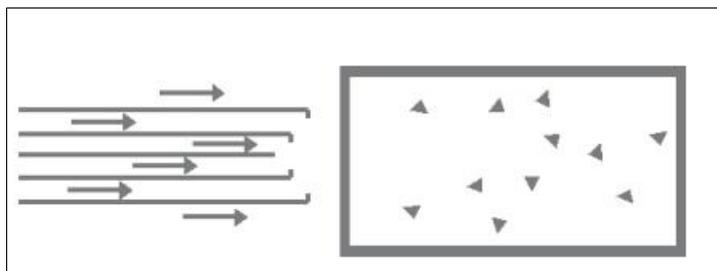


Figura 5.12 - Representação de uma fuga em vazio.

5.3.5 Utilização do gerador de ultra-sons para realização de inspecções

Haverá situações em que seja difícil ou consuma muito tempo realizar as inspecções em baixa pressão ou vazio (ou que as fontes de pressão ou vazio não estejam disponíveis). Nessas situações, será usado o transmissor de ultra-som (chamado de gerador de ultra-sons). Os ultra-sons transmitidos são reflectidos pelos obstáculos sólidos e penetrará através dos orifícios que apresentem fugas.

Este ensaio realiza-se colocando o transmissor ultra-sónico dentro (ou de um dos lados) do objecto a inspeccionar. O sinal de ultra-sons do transmissor, inundará instantaneamente o espaço do ensaio e penetra em qualquer orifício de fuga. Efectuando-se o varrimento da superfície exterior (ou do lado oposto) do objecto de ensaio com o detector de ultra-sons propagados no ar, a fuga pode ser detectada. Este tipo de detecção assemelha-se a ouvir um sinal agudo, semelhante ao canto de um pássaro.

No caso de serem áreas muito grandes, deverá utilizar-se uma série de geradores de ultra-sons, que são colocados de forma estratégica, de forma a gerarem ultra-sons intensos e uniforme dentro da área de ensaio. As ondas curtas do som de alta frequência serão reflectidas nas superfícies sólidas, mas, as ondas de som penetram através do lugar de fuga.

5.3.6 Ajuste da Sensibilidade

É importante ter em atenção em ajustar a sensibilidade do equipamento quando se aproxima da fuga, ou enquanto se aproxima do objecto de ensaio. Este procedimento é em parte a chave do método “grande a pequeno”. Falhas ao reduzir a sensibilidade podem provocar diagnósticos errados da localização exacta da fuga e causar confusão,

já que haverá muitos sons por decifrar. A unidade de ultra-sons dará a leitura em decibel (dB).

5.3.7 Dificuldades em identificar múltiplas origens de ultra-sons

Com bastante frequência, os níveis de som nos edifícios, assim como nas tubagens e nos equipamentos mecânicos, não interferem com a detecção dos ultra-sons. No entanto, há situações onde se geram intensas emissões ultra-sónicas. Quando esta situação se verifica, a inspecção de ultra-sons torna-se mais difícil. Para os sons audíveis de baixa frequência, ao utilizar os auriculares de som permitem ao inspector escutar as conversões heterodinadas dos ultra-sons detectados, sem ser afectadas por sons de fundo do edifício, enquanto se realiza a inspecção de ultra-sons. Há situações em que o som intenso estará presente em todo o processo de inspecção. Este pode vir de gases de alta pressão em fuga, de fugas de vapor, de bombas de vazão, de compressores, etc. É importante conhecer o tipo de equipamentos que se tem na envolvente, de forma a saber que tipo de equipamentos podem ter fugas de ar e que tipo de equipamentos pode causar interferências por ultra-sons. É muito importante que o técnico que realiza a inspecção tenha bons conhecimentos dos equipamentos. Para resolver o problema da multiplicidade de ultra-sons que se poderá ter existem métodos. Estes métodos apresentam a vantagem de que o ultra-som que apresentam uma onda curta e som direccional a amplitude reduz rapidamente com a distância.

Método para ajudar a identificar a fonte de ultra-sons de interesse

Controlo do ambiente: observar as operações que existem na envolvente, os ultra-sons de outras fontes que podem interferir com a inspecção em causa e sempre que possível, efectuar o seguinte procedimento:

- Parar as operações que causam outros ultra-sons;
- Efectuar as inspecções durante as paragens;
- Fechar as portas do espaço onde se esteja a realizar a inspecção.

Método “grande a fino”: o método mais usado para detecção de fugas, é chamado de “grande a fino”. Este método consiste em realizar a inspecção a uma determinada distância da área a inspeccionar e depois ir-se aproximando do local específico da fuga. O equipamento de ultra-sons deverá começar com a sensibilidade no máximo e depois

ser reduzida à medida que nos aproximamos da área exacta da fuga. Sempre que seja difícil determinar a localização do som da fuga, deve-se aumentar a sensibilidade do equipamento caso o nível do som seja baixo, caso contrário, deve-se baixar a sensibilidade. É importante efectuar o varrimento completo da área onde está localizada a fuga de forma a conseguir determinar com precisão a sua localização. Reduzindo a distância entre o dispositivo de detecção de ultra-sons propagado no ar e os ultra-sons emitidos, permite ao inspector determinar a localização exacta da fuga. Sempre que seja seguro, o inspector deve reduzir a distância entre o dispositivo de detecção e a fuga. Este procedimento ajuda o inspector a avaliar de maneira correcta a situação para determinar a diferença entre os ultra-sons normais de fundo e os que realmente correspondem à fuga.



Figura 5.13 - Método “grande a fino” (UE Systems inc, 2007).

Posição: Para detectar os ultra-sons é necessário o varrimento de uma área para a outra. Isto é uma técnica comum quando é difícil a aproximação do inspector da área de emissão dos ultra-sons. A movimentação de um lado para o outro e o registo das leituras dos ultra-sons, permite ao inspector determinar por exclusão, a localização exacta dos ultra-sons emitidos, uma vez que o sinal de ultra-sons é direccional, sendo sempre mais intenso na origem. Esta informação é preciosa, uma vez que existem muitas ondas de som reflectidas na mesma área de inspecção.



Figura 5.14 – Método de posição (SDT, 2014).

Deflexão sónica: A deflexão sónica pode ser uma fonte de confusão e levar a tomar leituras falsas. O som reflecte-se nas superfícies sólidas e ainda que exista algum grau de atenuação, a energia do som pode ser mal interpretada como uma fonte primária de fuga. Para evitar fazer o erro de determinar um lugar de fuga com deflexão sónica, é importante que se confirme o lugar da fuga com os métodos de confirmação.

5.3.8 Confirmação da localização das fugas

Existem várias técnicas que podem ser usadas para confirmar a localização das fugas.

Varrimento em todas as direcções - escutar o sinal mais forte e observar os valores dados pelo equipamento de ultra-sons para confirmar que realmente se “segue a linha” dos ultra-sons.

Método de selagem - é uma técnica usada com a sonda de focar. Com a sonda, uma fuga pode ser selada pressionando a ponta contra o lugar da fuga, cobrindo a fuga com a mesma sonda. Esta técnica é usada para identificar e confirmar fugas.

Ângulo de aproximação - apesar de não ser um método de confirmação, deve-se fazer a aproximação à fonte dos ultra-sons em linha directa com os ultra-sons de fuga. O ângulo de aproximação será importante quando seja o momento de indicar os custos energéticos. Para isto, usa-se a sonda de foco, e move-se a ponta da sonda entre os 30 cm a 38 cm da fonte da fuga e anota-se os níveis em dB.

Angulação - é outra forma de reduzir o efeito dos ultra-sons de outras fontes que não interessam. A angulação é importante porque os ultra-sons são direccionais e reflectem-

se nas superfícies sólidas. Quando se encontram ultra-sons de outras fontes, altera-se o ângulo de inspecção para o modo de varrimento, até se localizar com precisão os ultra-sons da fonte em análise.

Blindagem e barreiras - é o processo de colocar um material sólido portátil entre o inspector e o lugar de inspecção. Qualquer objecto que possa absorver ou reflectir o som, pode ser usado para blindar os ultra-sons que não interessam. Esta técnica não elimina o som, apenas reduz o impacto dos ultra-sons em concorrência. Alguns exemplos de barreiras existentes são as portas, partições, maquinaria fora de serviço, muros, entre outras. Se for necessário improvisar, também se pode usar cortinas de soldadura, cartão, panos ou outro tipo de objectos que possam bloquear os ultra-sons. Desta forma os efeitos de ultra-sons em concorrência podem ser minimizados ou eliminados utilizando uma barreira entre o inspector e a área de interesse da inspecção.



Figura 5.15 – Colocação de chapa metálica para blindagem de ultra-sons (UE Systems inc, 2007).

Corpo - sempre que se efectua uma inspecção, é necessário ter em conta a posição do corpo. Esta massa substância de água absorverá e reflectirá muito dos ultra-sons, se o inspector se colocar estrategicamente entre a área de inspecção e os ultra-sons em concorrência.

Técnicas de Mão – o uso de luvas é uma técnica usada para minimizar os ultra-sons em concorrência que possam passar através da ponta do detector de ultra. Envolver a mão enluvada na envolvente da ponta do módulo de foco enquanto se cobre por completo a área suspeita que tenha a fuga.



Figura 5.16 - Técnica de mão e do trapo (UE Systems inc, 2007).

Trapo - é o método mais usado para a blindagem dos ultra-sons em concorrência (ver Figura 5.16). Por vezes é necessário cobrir o extremo (não a abertura) da sonda de foco com um trapo para selar completamente a área que emite os ultra-sons.

Capa de apontamentos - blindar os ultra-sons pode ser tão fácil como colocar por exemplo a capa dos apontamentos entre a área a inspeccionar e os outros ultra-sons em concorrência.

5.4 Inspeções em ar comprimido

Numa economia global, uma forma de as empresas manterem uma vantagem competitiva, é usarem a tecnologia disponível para reduzirem os custos energéticos, localizando as fontes de desperdício. A tecnologia de ultra-sons está idealmente adequada para este propósito, especialmente quando se trata de localizar fugas de ar comprimido.

Segundo os cálculos efectuados pelos serviços de eficiência energética do ISQ, as instalações industriais gastam entre 3000 e 5000 euros anuais devido às fugas de ar comprimido. Os resultados das inspeções típicas de fugas de ar comprimido mostram poupanças significativas. Realizando as inspeções e corrigindo os problemas dos desperdícios energéticos, reduz-se obviamente o consumo de energia, aumentando a eficiência, maximizando a produtividade do ar, reduzindo as emissões de gases de efeito de estufa. Desta forma, incrementa-se a segurança, a qualidade e a responsabilidade ambiental e social por parte das instalações industriais.

5.4.1 Procedimento de uma inspecção para fugas de ar comprimido

Antes de se dar início à inspecção propriamente dita, deve-se preparar a inspecção, de acordo com o seguinte:

- Colocar especial atenção aos problemas óbvios como fugas que se podem reconhecer e etiquetar a olha “nu”;
- Observar a má gestão do uso do ar comprimido, como por exemplo, verificar se existem válvulas deixadas abertas, estado de conservação de purgadores, existência de panos na envolvente das tubagens para diminuir as fugas ou os níveis de ruído, máquinas pneumáticas sem a manutenção adequada, etc.;
- Estudar a melhor rota para a inspecção, e se possível, ter as plantas das tubagens de ar comprimido.

Depois de se ter efectuado o levantamento referido anteriormente e definida a rota de inspecção, pode-se passar para a inspecção propriamente dita, com a seguinte sequência:

1. Usar o detector de ultra-sons para procurar as fugas. Realizar a validação do detector de ultra-sons, e usar sempre os auriculares. Usar o método “grande a fino” para começar a localizar as fugas. Se houver dificuldades na localização da direcção das fugas, dever-se reduzir a sensibilidade. Seguir o som até ao lugar onde este seja mais forte. Usar a sonda de foco para superar os ultra-sons de concorrência, assinalar a fuga e guardar a leitura para depois se exportar para software dedicado;
2. Determinar o tipo de fluido da fuga. Seguir as tubagens de gases e reconhecer as condições que podem trocar a qualidade do som da fuga;
3. Por boa regra, começar a efectuar as inspecções no sentido, compressor – tubagens e seguir esse caminho até ao seu destino;
4. No início da inspecção, criar uma série de zonas de inspecção. Isto permite organizar a aproximação a todos os locais previstos, evitando que fique alguma fuga esquecida. Movimentação de uma zona à seguinte de uma maneira planeada e ordenada;
5. Localizar todas as fugas;
6. Guardar as leituras dos ultra-sons em decibel medidas entre os 30 a 38cm desde a ponta da sonda de foco até ao local da fuga.

7. Etiquetar todas as fugas. As etiquetas ajudam na localização dos locais a efectuar reparações;
8. Descarregar toda a informação do detector de ultra-sons para software próprio, de forma a se proceder à elaboração do relatório.
9. Controlar as fugas reparadas, e fazer o respectivo acompanhamento;
10. Após a reparação de todas as fugas, deverá ser efectuada uma nova inspecção de verificação;
11. Actualizar o relatório da inspecção, de forma a incluir as fugas já reparadas, as que ainda não estão, ou outras que entretanto foram identificadas.

O Relatório deve apresentar pelo menos a seguinte informação:

- Data, nome do inspector, n.º de certificado do inspector;
- Condições da inspecção;
- Equipamento utilizado;
- Condições ambientais (temperatura, humidade, pressão atmosférica, etc.);
- Descrição detalhada da inspecção;
- Descrição detalhada da localização da inspecção.

O factor mais importante a reportar numa inspecção, é identificar a inspecção com suficiente detalhe de forma a que a inspecção possa ser repetida sem ambiguidades, caso seja necessário. É importante que o inspector se aproxime ao objecto de ensaio da mesma forma, e que para as mesmas condições obtenha valores muito semelhantes ou iguais que na inspecção original.

Para que o relatório da inspecção seja de fácil leitura e identificação dos locais avaliados, estes devem incluir obrigatoriamente registo fotográfico de todas as fugas detectadas, estando estas já etiquetadas. Caso não seja possível colocar uma etiqueta na área de fuga, deverá ser usado um marcador. Existem softwares de cálculo que convertem os dB medidos na fuga em custos energéticos.

5.5 Inspeção em sistemas eléctricos

5.5.1 Introdução

As emissões eléctricas de componentes eléctricos têm sons característicos muito distintos. As emissões ultra-sónicas são causadas por anomalias eléctricas como o efeito de coroa, arco eléctrico e descargas eléctricas. Cada um tem a sua própria característica de som e um grau de severidade relacionado com o equipamento. Mediante a identificação de uma emissão e comparando-a com outra o inspector será capaz de avaliar a severidade das condições do equipamento. Para que uma inspeção eléctrica seja efectiva, o inspector deve ter pleno conhecimento do equipamento a inspeccionar. As assinaturas acústicas podem variar dependendo das condições de inspeção e da voltagem. Se o inspector não compreender que a qualidade do som pode variar devido à voltagem (baixa, média e alta voltagem), à localização e ao tipo de equipamento inspeccionado existirá um potencial de resultados errados.

Quando a electricidade escapa das linhas de alta voltagem através de uma abertura de uma conexão eléctrica, perturba as moléculas na sua envolvente e gera um ultra-som que é parecido ao de um travão a rugir. Em outras situações será um som parecido com um zumbido.

Algumas tecnologias só permitem inspeção da superfície no entanto os ultra-sons penetram até à abertura mais pequena, permitindo que as inspeções se possam fazer ainda que em sistemas activos e fechados. As aplicações típicas incluem: transformadores, painéis, geradores, cabos e terminações, isoladores, barramentos, barramentos blindados, relés, disjuntores, caixas de passagem, motores, e outros equipamentos eléctricos. Esta técnica é muito usada nas subestações eléctricas.

Os ensaios por ultra-sons podem ser utilizados para identificar e localizar uma grande variedade de falhas eléctricas, especificamente o efeito de coroa, o arco eléctrico e as descargas eléctricas. Falhas eléctricas além de custos elevados que acarretam podem também ser mortais. É por esta razão que os ultra-sons é uma técnica muito importante para localizar e identificar as emissões eléctricas, sendo muito importantes para a segurança. O método para detecção da formação de arcos eléctricos, de descargas eléctricas, e do efeito de coroa é similar ao procedimento para detecção de fugas. Mas em vez de se escutar um som de “ráfaga”, o inspector escuta um “crujido” ou zumbido.

Nas inspeções eléctricas é muito importante que o inspector conheça bem o que está a fazer, caso contrário deverá ser acompanhado pelo responsável da segurança.

5.5.2 Emissão e inspeção de ultra-sons na electricidade

As assinaturas dos ultra-sons do efeito de coroa, descargas eléctricas e arco eléctrico podem ser detectadas facilmente. A leitura de decibéis usa-se para identificar o lugar da emissão. A severidade da emissão não está relacionada com a leitura de decibéis. Características importantes do ultra-sons transmitido no ar são: segurança, pode detectar-se em voltagens baixas, médias e altas. A assinatura audível do efeito de coroa, arco eléctrico e descargas eléctricas, podem ser gravadas e analisadas no software de análise espectral.

5.5.3 Efeito de coroa

Fenómeno que ocorre na vizinhança imediata dos cabos condutores e na presença de um intenso campo eléctrico; as moléculas de gás do ar são ionizadas, originam milhares de descargas eléctricas intermitentes que causam um ruído audível semelhante a um crepitar ou zumbido. O efeito de coroa varia consoante as condições ambientais, intensificando-se com a humidade.

Analisando a assinatura do som

O espectro de frequência (Figura 5.17) do efeito de coroa apresenta harmónicas ou picos repetitivos de 60Hz (neste caso, para o sistema eléctrico dos EUA). Isto nem sempre acontece, no entanto é uma pista da sua manifestação.

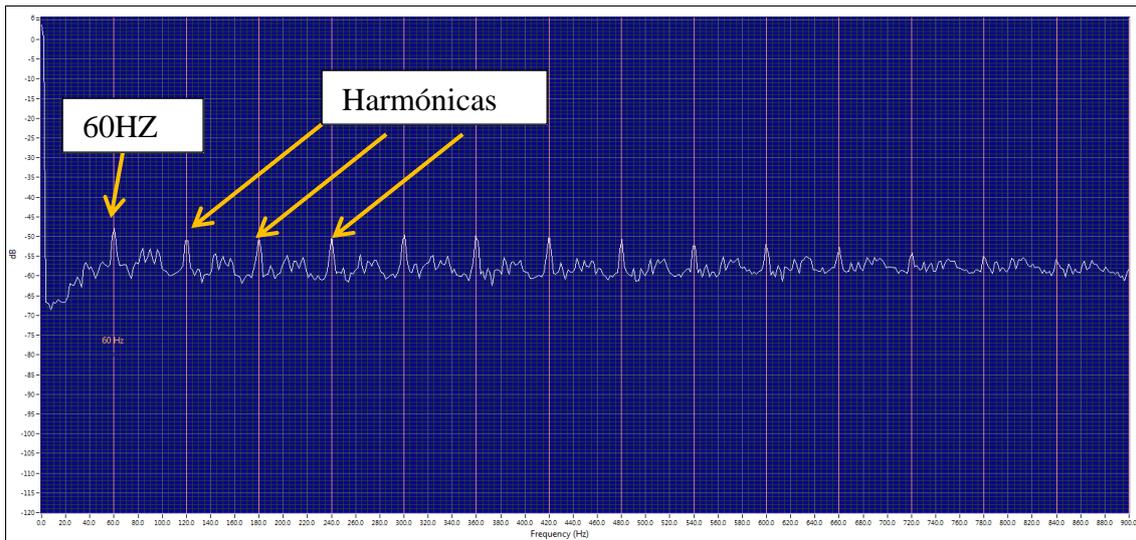


Figura 5.17 – Espectro de frequência para o efeito de coroa, para o sistema eléctrico dos EUA (60Hz).

Na análise da forma de onda (Figura 5.18), os picos aparecem com a mesma separação e baixa frequência. A altura dos picos é uniforme. Isto é referido como altura de banda uniforme. A forma de onda no tempo permite ver com clareza o efeito de coroa.

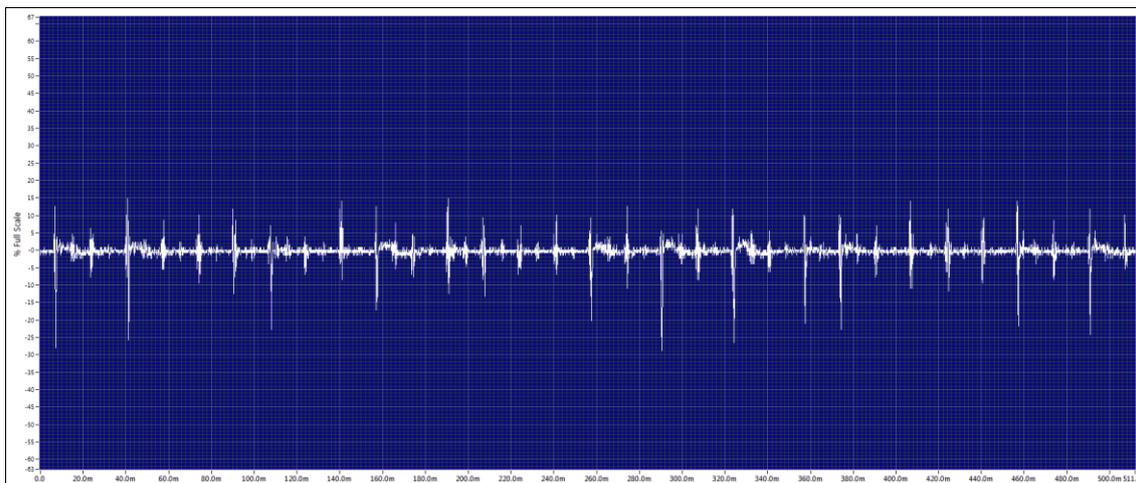


Figura 5.18 - Forma de onda do efeito de coroa, para o sistema eléctrico dos EUA (60Hz).

O efeito de coroa produz um zumbido constante. A linha de base do som do efeito de coroa é a ausência de som. Na Figura 5.19 as setas amarelas representam as descargas, que ocorrem na parte negativa da onda sinusoidal. Dependendo da severidade das descargas estas tomam lugar em diferentes pontos da onda e tem diferentes durações. Por exemplo: Para que o ar seja condutor de descargas deve-se alcançar pelo menos os 1000 Volts.

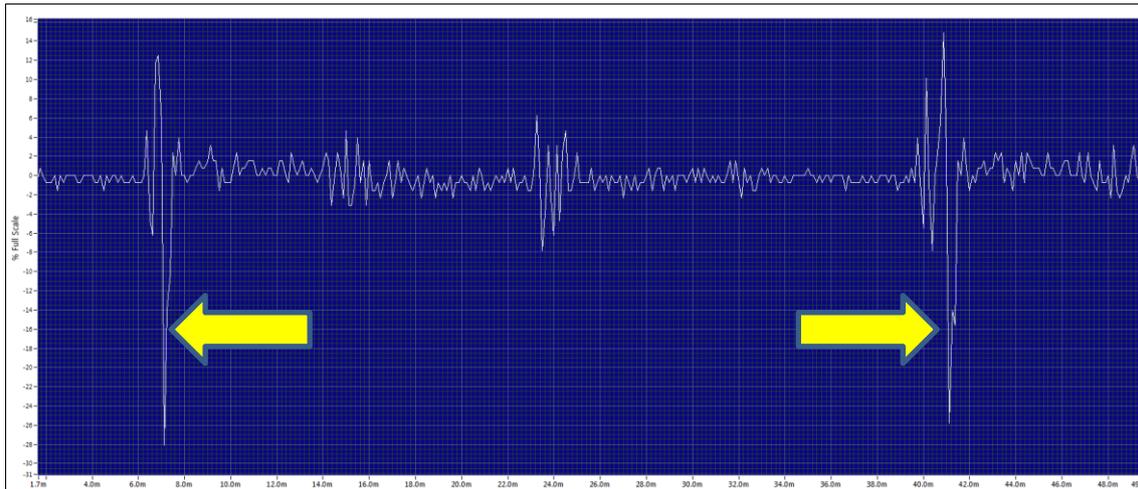


Figura 5.19 – Pontos de descarga na forma de onda do efeito de coroa.

A amplitude dos picos no domínio do tempo encontra-se igualmente espaçada e os pontos de descarga ocorrem nos pontos de tensão mais baixos da onda sinusoidal, picos negativos.

5.5.4 Descargas eléctricas

Também conhecido como “arco bebé”, o qual segue a rota de um isolante danificado. Uma grande diferença de tensão cria gradualmente uma via de fuga da condução através da superfície do material deixando restos carbonizados. As descargas eléctricas iniciam-se silenciosamente e crescem de intensidade ou amplitude até alcançar descargas parciais reiniciando este ciclo (pode ocorrer muito rápida e muitas vezes em milissegundos). Para que a descarga eléctrica aconteça os contaminantes como o pó, a sujidade ou a humidade devem estar presentes para permitir que a electricidade siga um caminho. Esta condução inicia com um pouco de calor gerado nas primeiras etapas até incrementos consideráveis de calor quando agudiza o problema. A falha nestas situações é iminente.

Assinatura de som da descarga eléctrica

Na análise do sinal em frequência (Figura 5.20) apareceram poucas ou nenhuma harmónicas.

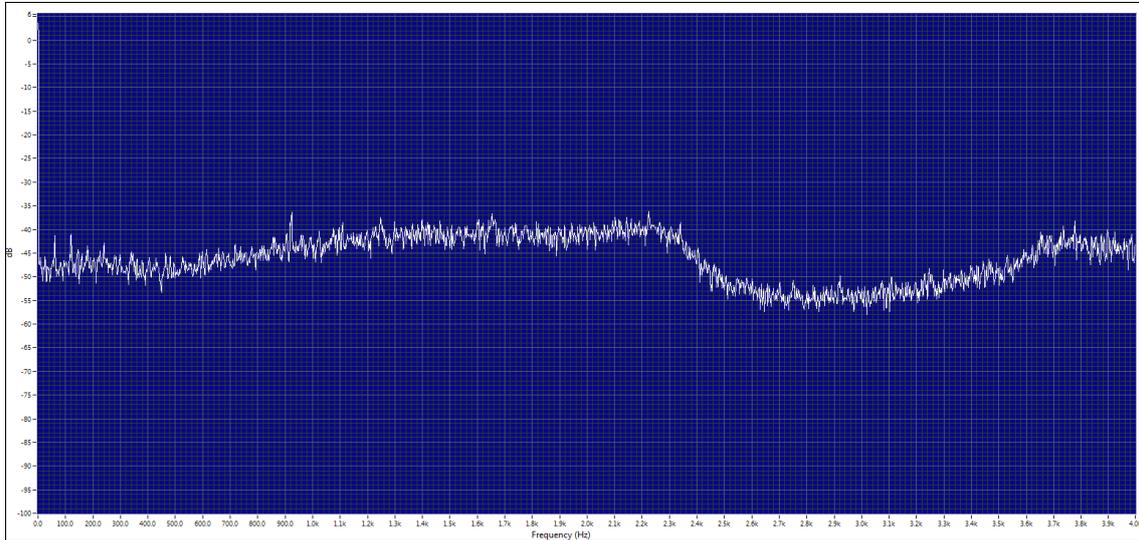


Figura 5.20 – Espectro de frequência para a descarga eléctrica.

Na análise de forma de onda no tempo (Figura 5.21), os picos ou descargas são esporádicos e a frequência está muito saturada.

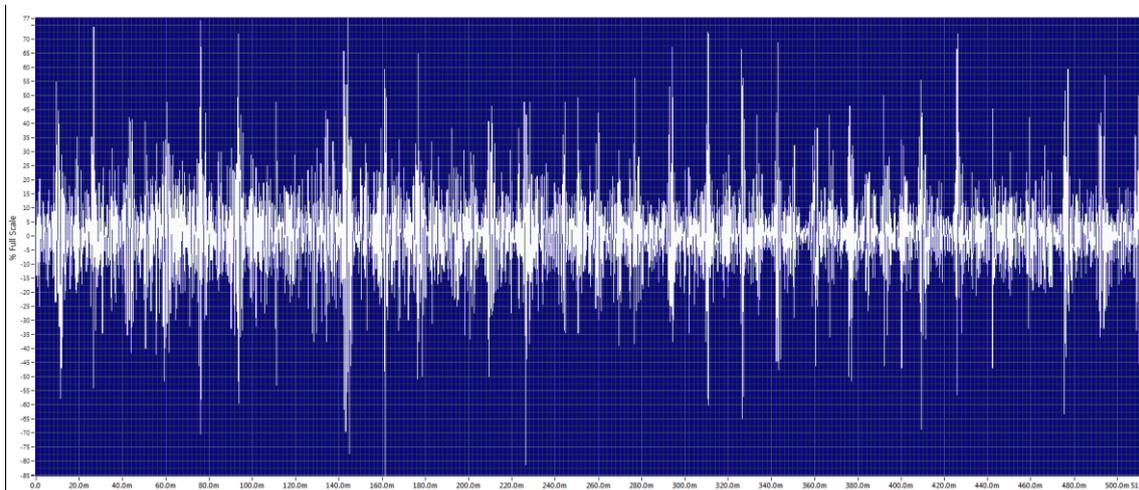


Figura 5.21 - Forma de onda da descarga eléctrica.

Som: É uma combinação de um som de zumbido inconsistente e pequenas explosões de som. O processo de seguimento é repetitivo, armazenando sua intensidade para depois descarregar, o som apercebido é semelhante ao do azeite quente. O volume ou o nível de decibéis desvanecerá quando as explosões ou descargas se dão de forma esporádica.

Pontos de descarga

Quando a descarga eléctrica ocorre, existe um caminho de baixa corrente através do isolamento pelo que a descarga não tem que suceder no pico da forma da onda. Isto pode ser observado pelas linhas verticais da Figura (5.22). O espaçamento dos picos nas séries de tempo não são uniformes e correspondem a sons de “chasquido” que se escutam nos auriculares que não está distribuídos de forma uniforme no tempo. À medida que a descarga eléctrica se torna mais grave, há mais eventos de descarga e por tanto mais picos não uniformes espaçados estreitamente.

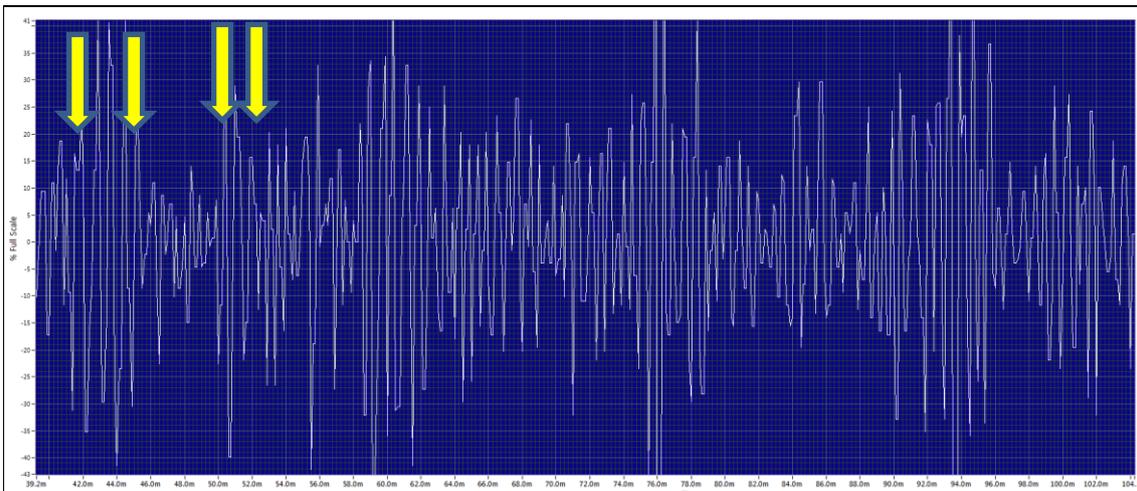


Figura 5.22 – Pontos de descarga - descarga eléctrica.

5.5.5 Arco eléctrico

O arco eléctrico é muito repentino e violento, começando por uma intensidade total e termina quase de imediato. O arco desenvolve-se num caminho de alta corrente até a terra e sempre acompanhado por um calor significativo, bem como com um som forte. Isto é sempre uma causa de preocupação, pois a falha é iminente e acções correctivas devem ser tomadas com urgência. Todos os arcos eléctricos geram uma intensa luz ultravioleta. A luz ultravioleta é invisível e mesmo em intensidades moderadas podem destruir a retina do olho.

Características do som:

Na análise do espectro de frequência (Figura 5.23), não há nada que se possa reconhecer como sendo um padrão.

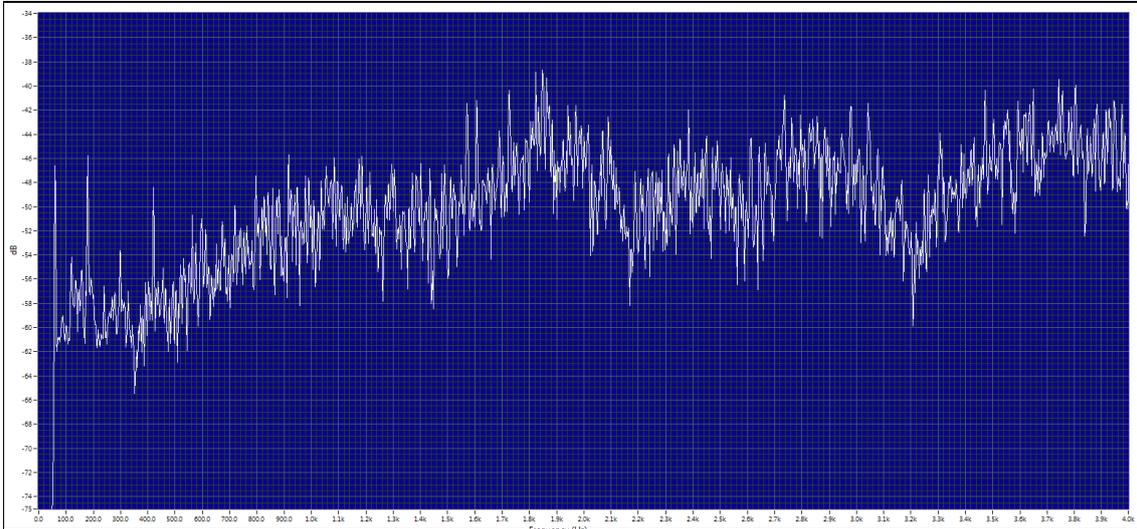


Figura 5.23 – Espectro de frequências do arco eléctrico.

Na análise da forma de onda no tempo (ver Figura 5.24) onde apreciamos a onda sinusoidal, nota-se as descargas curtas, rápidas e abruptas sem frequência entre a duração das descargas. O som caracteriza-se por descargas curtas, violentas e intermitentes.

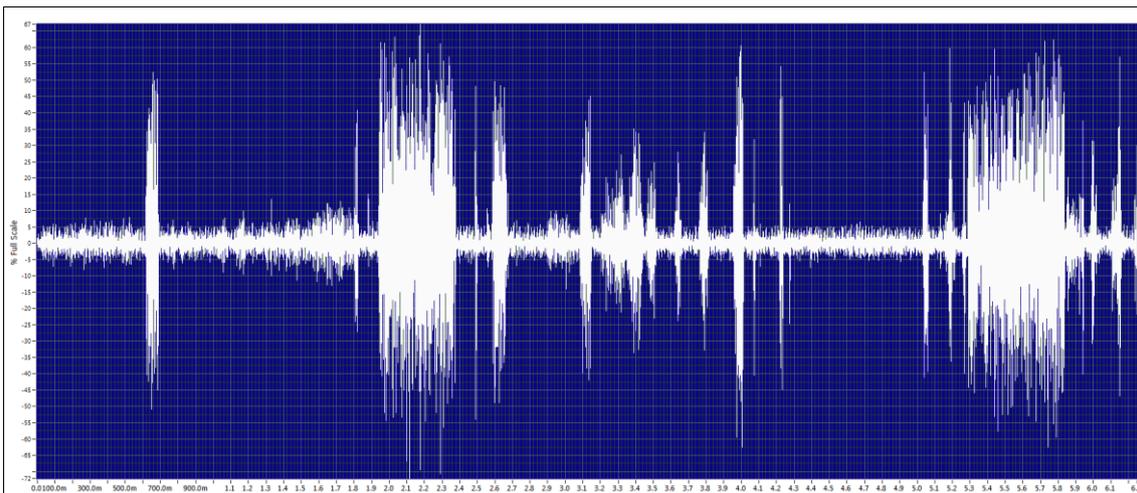


Figura 5.24 – Forma de onda no tempo do arco eléctrico.

Pontos de descarga do arco eléctrico

Durante o arco, a descarga à terra (através do isolador) é um passo de alta corrente sobre o isolador que não requer um grande potencial. Esta é uma descarga de energia que dura por períodos estendidos de tempo. Esta é indicada pela seta na Figura (5.25), onde se vêem picos amplos na série da linha de tempo.

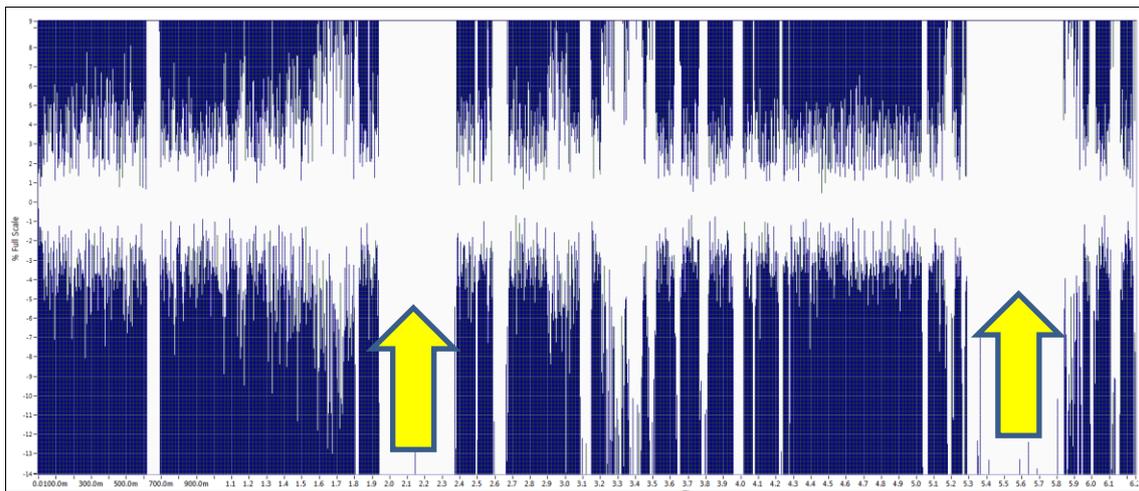


Figura 5.25 – Pontos de descarga do arco eléctrico.

Qualidade sonora: Na interpretação da localização dos defeitos, é importante entender a qualidade do som para o diagnóstico. Isto inclui entender a diferença no padrão de som do efeito de coroa, descarga eléctrica e da formação de arcos eléctricos. A recolha e gravação do sinal para posterior análise, deve ser efectuada da forma mais limpa e intensa possível (ou seja, um sinal sem ruídos que não interessem para a análise).

5.5.6 Ultra-sons e a termografia

Termografia: As câmaras infravermelhas detectam ondas infravermelhas que estão por debaixo do espectro visível. Estas emissões estão relacionadas com as temperaturas. Tudo por cima do zero absoluto produz alguma forma de infravermelho que pode ser detectado por estes instrumentos. Para que a informação seja eficaz tem que ser capaz de “ver” o calor. Portanto um equipamento não pode ser inspeccionado por infravermelhos se está fechado e não há possibilidades da sua exposição à Câmara.

Ultra-som: Para que um elemento possa ser inspeccionado com ultra-sons, deve emitir um som de alta frequência. Se este som de alta frequência não existir, não se pode inspeccionar esse elemento.

Os problemas podem manifestar-se em equipamentos eléctricos como alterações na temperatura e/ou como emissões ultra-sons. Ultra-sons e termografia complementam-se entre si ao inspecionar áreas que apresentem efeito de coroa, descargas eléctricas, e formação de arco, descargas parciais e fugas superficiais.

5.5.7 Inspeção visual

Quando se fala do arco eléctrico, descarga eléctrica e efeito de coroa pode haver indicações que podem ser observadas com a inspecção visual.

5.5.8 Inspeção de baixa voltagem

A principal preocupação nos equipamentos de baixa tensão é o arco eléctrico. Normalmente os sistemas de 110, 220 e 440 volts, com imagens de infravermelhos detectam-se alterações de temperatura. Pontos quentes são normalmente indicação de resistência, o qual é um indicador de possibilidade de falha do equipamento ou indicador de risco de incêndio. Quando se produz arco eléctrico, este é acompanhado por muito calor. No entanto, nem sempre é possível detectar um ponto quente se o equipamento esta fechado. Os ultra-sons detectam o arco eléctrico através de um varrimento rápido na junta da porta ou abertura. O método mais eficaz de inspecção de baixa tensão será o de combinar a técnica de infravermelhos com a de ultra-sons.

5.5.9 Inspeção de voltagem média e alta

Voltagens altas incrementam o potencial de falha. O arco eléctrico, efeito de coroa, descargas eléctricas e componentes mecânicos soltos produzem ultra-sons detectáveis que indicam falhas eminentes. A detecção de estas emissões é relativamente fácil com ultra-sons, pois a diferença acústica entre estes eventos potencialmente destrutivos é o padrão de som. O arco eléctrico produz estalitos, com arranques e paragens repentinas de energia, enquanto o efeito de coroa é um zumbido constante. Efeito de coroa tem uma acumulação e despreendimento de energia que resulta num som de zumbido acompanhado de batedelas.

Se o equipamento a inspecionar se encontra a uma distância considerável, deverá ser utilizado um reflector parabólico ou o módulo de longo alcance. Estes acessórios duplicam a distância de detecção em comparação com os módulos varrimento.

5.5.10 Procedimentos e técnicas de inspecção

Factores a considerar: -segurança; -ultra-sons de concorrência; -técnicas de blindagem; -acesso aos equipamentos; -distância, -deflexão do ultra-som; -métodos de confirmação.

Amplitude das emissões eléctricas

Uma pequena alteração na localização da medição pode fazer uma grande diferença no nível de dB. Alterações nos padrões de som são a melhor forma de monitorizar alterações na severidade. Não existem tendências nas falhas eléctricas. Uma descarga disruptiva ou arco eléctrico pode ocorrer em qualquer momento.

Método de grosso a fino

Assim como na detecção de fugas de gases, ultra-sons no ar causados por anomalias eléctricas são mais fortes na fonte do emissor. Quando se pretende localizar uma anomalia eléctrica, deve-se fazer uma análise geral e depois mover-se em direcção à fonte e ir ajustando a sensibilidade para assim poder localizar a origem dos ultra-sons.

Acesso à fonte

Os objectos sólidos bloqueiam os ultra-sons. Se existe algo entre o detector de ultra-sons e a fonte, esse objecto bloqueia os ultra-sons.

5.5.11 Ultra-sons concorrentes e técnicas de blindagem

Controlo da envolvente: técnica que se podem usar para determinar a origem dos ultra-sons. Desligar o equipamento, fechar uma porta, mover um objecto ou solicitar a alguém que deixe de realizar uma tarefa até que haja terminado a sua inspecção.

Sonda de plástico: o plástico atenuará o ultra-som e também será um bom isolante. Quando se está próximo dos equipamentos eléctricos é uma boa ideia colocar a sonda de plástico centrado no detector de ultra-sons propagado no ar.

Angulação: deve-se ter em atenção o ângulo do detector de ultra-sons, para reduzir os ultra-sons de concorrência.

Reduzir a distância: sempre que for seguro, a distância é um factor muito importante na procura de efeitos de coroa, descargas eléctricas e formação de arcos eléctricos. Da

mesma forma que na detecção de fugas, é necessário estar suficientemente próximo da fonte de ultra-sons para detecção.

A atenuação do ultra-som causado pela ionização no ar durante o efeito de coroa, descargas eléctricas e formação de arcos é causada por uma perda de energia. Em outras palavras, os picos e vales de energia diminuem na altura da onda enquanto perde energia. A velocidade, a frequência e longitude de onda não variam. Isto quer dizer, que pode ser necessário a ajuda de uma antena parabólica ou um módulo de longo alcance, já que pode não ser seguro, ou mesmo não ser possível chegar próximo da fonte eléctrica, que se pretende inspeccionar.



Figura 5.26 – Inspeção eléctrica com sensor parabólico (SDT, 2014)

Deflexão sónica

Verificar sempre a origem do som, pois este pode vir de muitas direcções e ser confundido com o que se procura.

Prioridades a inspeccionar nos equipamentos

É importante o inspector conhecer o equipamento a avaliar, pois quanto mais conhecer mais facilmente compreende o que está a acontecer. Por tanto, existe a possibilidade que conhecendo os sons inerentes dos equipamentos vs. sons problemáticos, o inspector deve ser capaz de compreender a fonte dos ultra-sons.

Saber qual a parte do equipamento é mais provável que avarie primeiro, e dar prioridade à inspeção de partes do equipamento de natureza crítica. Outro factor importante, nas prioridades das inspeções, é saber-se quais são os componentes críticos de

funcionamento de cada equipamento. Sem a identificação dos componentes críticos de funcionamento, qualquer tipo de inspeção não terá o mesmo sentido. Outro factor a considerar na determinação das prioridades das inspecções é a quantidade de tempo de inactividade ou tempo morto para as reparações. Por fim, a experiência do inspector também pode ajudar nas prioridades de inspeção.

5.6 Inspeção de válvulas

5.6.1 A inspeção através de estruturas

Os ultra-sons através de estruturas geram-se quando as vibrações do som transferem a sua energia para um sólido, através de uma série de deslocamentos de partículas (fluxo turbulento gerado pelas obstruções). Quando se inspeccionam válvulas, os ultra-sons originam-se quando o fluido move-se dentro da tubeira. Para detectar ultra-sons o inspector coloca o módulo de contacto ou guia de onda no ponto de ensaio para captar os ultra-sons através da estrutura sólida. A qualidade do som escutado pelo inspector dependendo do sujeito de prova e das anomalias.

Os procedimentos de inspeção usando o módulo de contacto devem incluir o procedimento de contacto. Este procedimento melhorará a qualidade, repetibilidade e a fiabilidade da prova. Esta aproximação é importante ao realizar as inspecções mecânicas, para minimizar as variáveis nas técnicas de inspeção. Para isso deve-se marcar a área de contacto, colocar a sonda sempre de forma perpendicular. Desta forma a qualidade da inspeção melhorará, permitindo fazer inspecções consistentes, no mesmo lugar, com o mesmo ângulo de inspeção, e exercendo a mesma quantidade de pressão.

5.6.2 Válvulas

Existem muitos tipos de válvulas. Estes dispositivos controlam o fluido ou a pressão numa tubeira ou entre os componentes de uma máquina. De forma geral, uma válvula abre e fecha para permitir a passagem do fluido.

Técnicas gerais de inspeção de válvulas

Há várias formas de inspeccionar uma válvula:

Visualmente: procurar descolorações, condensações, ou água a pingar na envolvente;

Sensores de temperatura: ao comparar os diferenciais de temperatura da água em cada um dos lados, podem-se identificar condições como obstruções e fugas;

Acusticamente – Os estetoscópicos mecânicos podem captar fugas nas válvulas. As limitações são que frequentemente é difícil localizar a fonte exacta do som de baixa frequência, e a maioria dos sons das tubeiras produzem interferências, que fazem que a inspeção de válvulas apoiada em detectores de sons de baixa frequência seja muito difícil;

Instrumentos de ultra-sons: O ultra-som é localizável. Aprendendo este método, a localização de uma válvula com fugas é rápido e preciso.

Os ultra-sons detectam o fluxo turbulento. A produção e quantidade de turbulência estão afectadas directamente pela viscosidade do fluido (por exemplo, água e óleo), os diferenciais de pressão (diferenciais de pressão baixos ou nulos dão como resultado uma turbulência baixa ou nula). Se a válvula está completamente aberta, haverá consideravelmente menos turbulência que em uma válvula fechada, a qual produz turbulência. É necessário que exista turbulência suficiente para determinar a direcção do fluxo, bloqueios parciais, ou válvulas com fugas internamente. O melhor método para ensaiar válvulas é o chamado método A, B C D e em determinadas situações E.

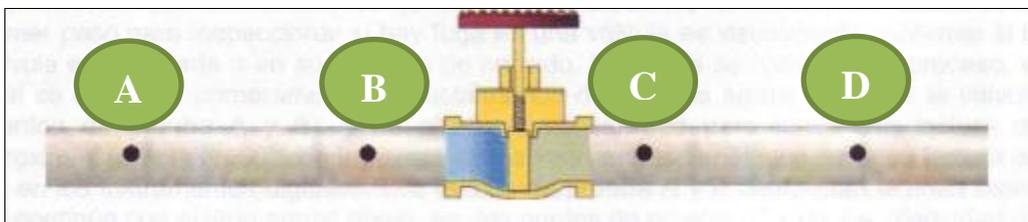


Figura 5.27 –Pontos de medida para inspeção de válvulas, adaptado (UE Systems inc, 2007).

Este método desenvolve-se da seguinte forma (ver Figura 5.27). Dois pontos equidistantes acima da válvula (A e B) estão comparados com outros dois pontos

equidistantes abaixo da válvula (C e D). Pode também ser necessário mais um ponto de medição localizado depois do ponto D.

Quando se usa duas localizações antes da válvula e duas ou três depois, como regra geral, pode ser usado o diâmetro do tubo onde está conectada a válvula como guia de medição, como representado na Figura 5.28.

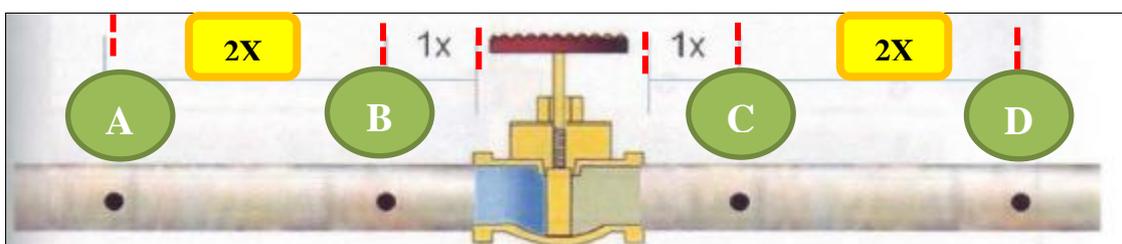


Figura 5.28 – Distância dos pontos de medição para ensaios em válvulas, adaptado (UE Systems inc, 2007).

O ponto de prova A deverá ser duas vezes o diâmetro do tubo antes do ponto de prova B. O ponto de prova B deverá ser igual ao diâmetro do tubo antes da válvula. O ponto de prova C deverá estar imediatamente depois do corpo da válvula à distância do diâmetro do tubo. O ponto de prova D deve estar a duas vezes do diâmetro do tubo do ponto C.

Quando se inspecciona válvulas, deve-se ajustar a sensibilidade comparar medições antes e após das válvulas, tocar com o módulo de contacto próximo da fonte de turbulência e observar as condições do fluido e seu fluxo.

As válvulas tipicamente operam em dois sentidos. Podem ser válvulas de modelação ou válvulas abertas/fechadas. Os procedimentos de inspeção para ambas as válvulas são semelhantes, mas os técnicos que vão realizar a inspeção devem identificar o tipo de operação da válvula antes de inspeccionar.

Válvulas abertas/fechadas

As válvulas inspeccionam-se com o detector de ultra-sons utilizando o módulo de contacto. O primeiro passo para verificar se uma válvula está com fuga, é verificar se está fechada. Desta forma, começa-se o procedimento de inspeção, iniciando-se a medição nos pontos A e B ajustando-se a sensibilidade para ter uma leitura de aproximadamente uns 50% da escala dos instrumentos analógicos ou por leitura em dB

nos instrumentos digitais. Os pontos de prova A e B são a linha base. Depois medem-se os pontos C e D. A intensidade do som na linha base A e B compara-se com o ponto de prova C. O ponto de prova D mede-se para assegurar que não existe algum sinal ultra-sónico que se transmita depois da válvula. Se a leitura de D é maior que a leitura de C, significa que o som ultra-sónico está a ser transmitido depois da válvula.

Caso seja possível este som ultra-sónico deve ser cortado para ter uma inspeção adequada da válvula inspeccionada. Quando não seja possível desligar ou ajustar o ultra-som gerado águas abaixo, encontre a fonte no ponto de leitura maior para determinar seu efeito no resultado.

Se a válvula apresentar fugas, o ponto C será o que apresenta níveis maiores, como se pode ver pela Figura (5.29).

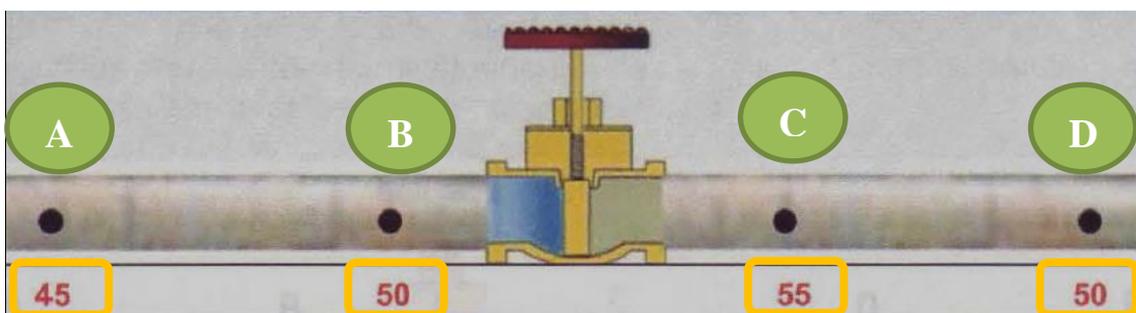


Figura 5.29 – Exemplo dos níveis sonoros por pontos de amostragem para uma válvula com fugas, adaptado (UE Systems inc, 2007).

Se a válvula estiver fechada os pontos C e D devem ser iguais ou menores que A e B, conforme representado na Figura 5.30.

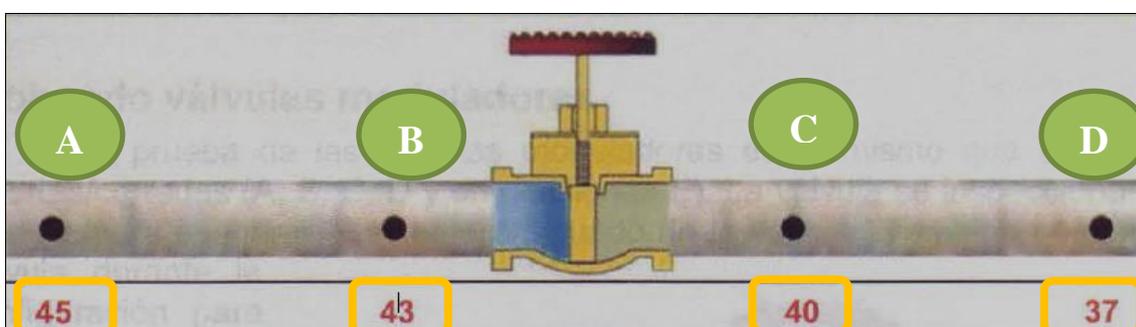


Figura 5.30 - Exemplo dos níveis sonoros por pontos de amostragem para uma válvula fechada, adaptado (UE Systems inc, 2007).

Por sua vez se a válvula estiver aberta os pontos A, B, C e D devem apresentar valores muito similares, conforme se observa pela Figura 5.31.

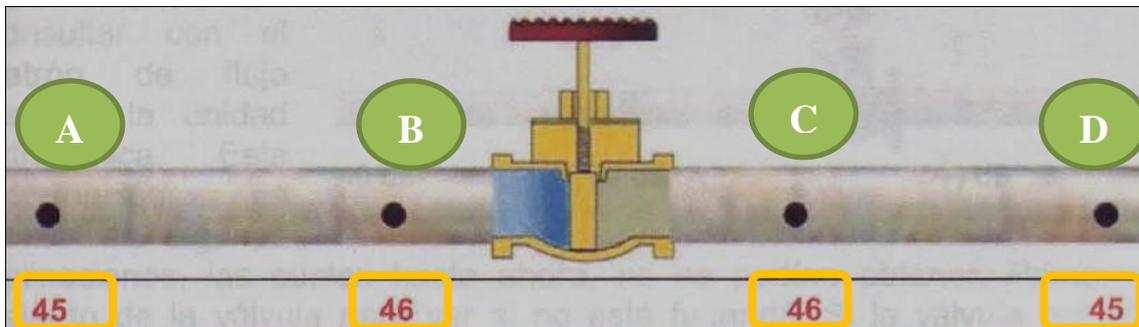


Figura 5.31 – Exemplos de níveis sonoros medidos em vários pontos de medição, adaptado (UE Systems inc, 2007).

Determinar a fonte de turbulência

Quando as leituras D e E são maiores que a leitura C, pode significar que exista um som propagado na estrutura “águas abaixo”. Isto pode significar que a válvula não apresenta fugas e que o som mais forte provém de alguma obstrução de águas abaixo. Para se determinar a fonte de turbulência, deve-se fazer mais medições (por exemplo, F, G, H...) até se encontrar a causa do som.

Comparação de dados

Para a elaboração do relatório ou fazer comparações, a vista de espectros de frequência pode ser usada para fazer os pontos A, B, C e D, para se elaborar um gráfico com uso de marcadores conforme se representa da Figura 5.32.

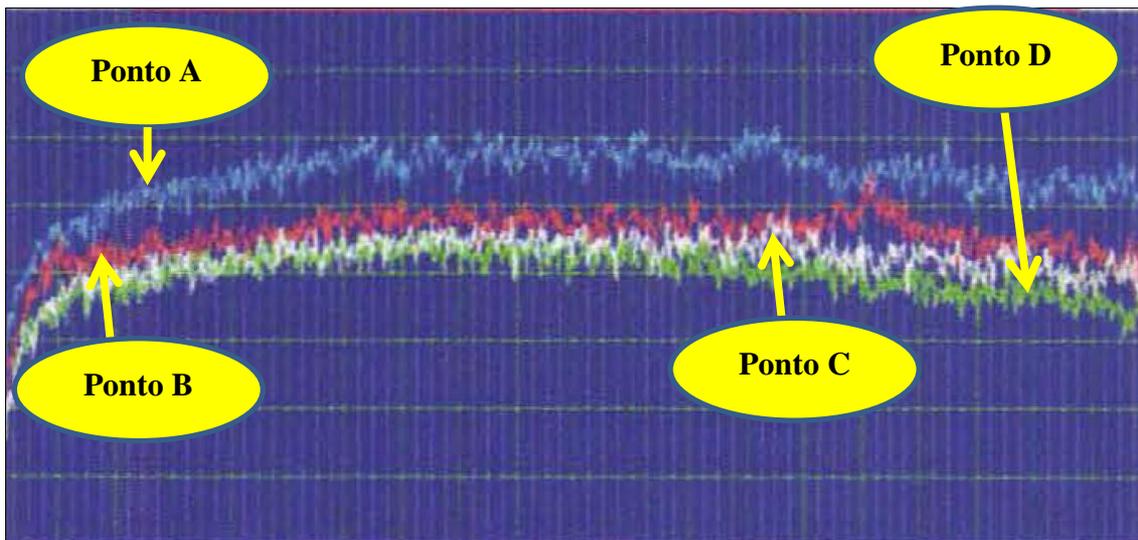


Figura 5.32 – Espectros de frequência para vários pontos de medição (por exemplo A, B, C e D), adaptado (UE Systems inc, 2007).

A forma de onda do sinal também pode ajudar com o diagnóstico da condição de válvulas. Como se pode ver na Figura 5.33 facilmente se compreende se a válvula está a funcionar correctamente ou se apresenta defeitos.

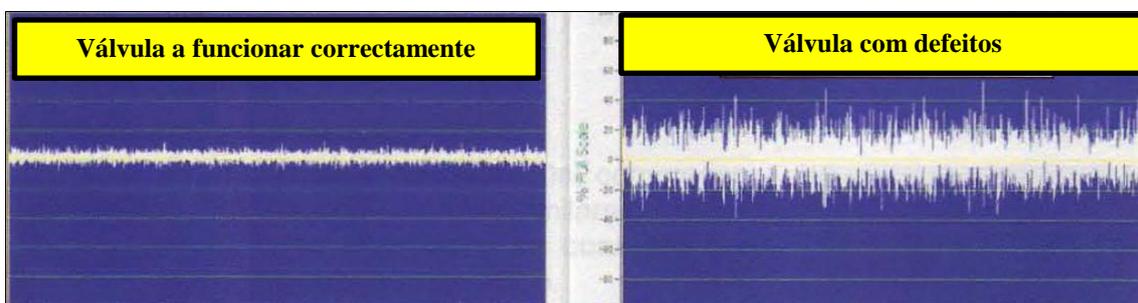


Figura 5.33 – Forma de onda do sinal no tempo para uma válvula a funcionar correctamente e com defeitos, adaptado (UE Systems inc, 2007).

5.7 Inspeções mecânicas

A manutenção condicionada identifica o estado de condição de uma máquina/equipamento, e requer para isso ferramentas de diagnóstico para recolher dados específicos do funcionamento de uma máquina. Os instrumentos de ultra-sons podem recolher muitos indicadores de funcionamento. Por esse motivo a incorporação da técnica de detecção de ultra-som pode ajudar a manutenção condicionada a cumprir o seu objectivo.

Dado que os materiais sólidos bloqueiam a maior parte dos ultra-sons e dificultam a sua capacidade para converter as ondas transmitidas na estrutura em ondas propagadas no ar, na inspeção de rolamentos utiliza-se o módulo de contacto ou módulo estetoscópio, que é na realidade é um guia de ondas. Esta guia de ondas recebe os ultra-sons transmitidos desde o interior do rolamento, de seguida o sinal é heteródino a uma frequência audível, permitindo ao inspector analisar a qualidade do som. Se o equipamento de ultra-sons permitir pode-se gravar o som e reproduzir-se posteriormente em software para tratamento do sinal (pode-se analisar a forma de onda, e o espectro de frequência) para ajudar o inspector a verificar a condição do rolamento.

Um rolamento sem defeitos e quando adequadamente lubrificado emite ultra-sons de baixa amplitude. Se o rolamento apresentar defeitos os níveis de ultra-sons aumentam e podem ser identificados.

Os ultra-sons detectam a fase inicial de uma falha nos rolamentos. Investigação realizada a cabo pela NASA (UE Systems inc, 2007), demonstrou que a monitorização de rolamentos com ultra-sons identifica potenciais falhas de rolamentos muito antes de serem detectados pelos métodos tradicionais de temperatura e vibração. Com os ultra-sons, os utilizadores ouvem a qualidade do som de um rolamento, monitorizando também as mudanças na amplitude no visor/medidor. É possível assim analisar tendências, resolver problemas e confirmar potenciais problemas nos rolamentos. A inspeção dos rolamentos é fácil com os ultra-sons. Apenas com um ponto de teste e muito pouca formação, os utilizadores aprenderão a testar os rolamentos em poucos minutos. A sintonização de frequência facilita o ajuste de um rolamento e o respectivo isolamento para análise independentemente dos sinais concorrentes.

A inspecção ultra-sónica em rolamentos permite:

- Alertas de defeitos incipientes;
- Detecção de falta de lubrificação, e verificação da quantidade ideal de lubrificação necessária, evitando a lubrificação em excesso;
- Software para análise e tratamento dos dados, permitindo identificar as frequências de defeito.

O esforço normal em um rolamento pode provocar uma deformação elástica dos elementos na área de contacto. Por sua vez causará uma distribuição elíptica suave, que provocará que as superfícies dos rolamentos apresentem deformações microscópicas que afectaram a distribuição ideal da tensão do rolamento. A lubrificação adequada pode compensar a distribuição da tensão afectada pelos defeitos. As deformações microscópicas contribuem para o desgaste e a deformação anormal do rolamento. A vida útil do rolamento é afectada pela quantidade correcta de lubrificante.

Por tanto o rolamento lubrificado correctamente gera menos energia acústica, e isto, possibilita a criação da linha de base para esse rolamento. A falta de lubrificação ou o seu excesso causará um aumento no nível de emissão de ultra-sons.

5.7.1 Técnicas e procedimentos de inspecção

Método de contacto

Os procedimentos de inspecção para o método de contacto devem incluir o módulo de estetoscópio para melhorar a qualidade, repetibilidade e a confiança do ensaio. O método de contacto é importante quando se desenvolvem inspecções mecânicas para reduzir a variabilidade das técnicas de inspecção. Uma das formas de reduzir a variabilidade no método de contacto é marcar a área a inspeccionar para que as medições sejam recolhidas consistentemente na mesma área. Outra técnica consiste em colocar sempre o módulo de contacto perpendicularmente (ou em ângulo recto) ao objecto de prova permitindo que o peso do detector de ultra-sons descansa no objecto de prova.

Acesso à fonte

A acessibilidade à fonte é necessária enquanto se desenvolvem inspeções mecânicas com ultra-sons devido a que este procedimento se realiza com o módulo de estetoscópio. Em alguns casos, pode-se usar uma sonda de extensão para conectar ao detector de ultra-sons permitindo ao inspector permanecer longe do objecto de ensaio. Esta situação é muito conveniente quando o objecto de ensaio se encontra elevado, já que permite ao inspector ficar no solo. Caso este método não seja possível, deve-se usar uma grua para chegar até aos equipamentos a inspeccionar.

Sensores montados de forma remota, também podem ser usados. Quando o equipamento se deve inspeccionar periodicamente, os módulos podem montar-se de forma permanente no equipamento a inspeccionar. Estes sensores podem adaptar-se com cabos e acessórios que podem conectar-se ao instrumento ultra-sónico.

De grosso a fino

Para localizar mais facilmente os ultra-sons mecânicos pode-se usar o método de “grosso a fino”. Este tipo de inspecção mecânica incorpora o ajuste de sensibilidade, enquanto se faz o contacto do equipamento sujeito a ensaio com o módulo de contacto. Os ultra-sons serão mais elevados quando o módulo se aproxima da fonte. O método é semelhante ao da inspecção de fugas.

O valor desta técnica depende da natureza do sujeito de prova. Isto é particularmente interessante quando o sujeito à prova é grande, com a possibilidade de ter muitas áreas problemáticas.

Sempre que se verifiquem ultra-sons de concorrência, e sempre que possível deverá desligar-se os equipamentos que os estejam a produzir. Para além desta possibilidade, poderá também ajudar, a utilização da sonda de foco de borracha e um trapo. A sonda de foco de borracha está desenhada para encaixar na barra de metal e proteger contra ultra-sons de concorrência. O pano ou trapo proporcionará protecção envolvendo esta na envolvente da placa frontal do módulo, onde se une a vareta de metal. Isto deverá eliminar a maior parte dos ultra-sons de concorrência.

Sempre que o ruído ambiente seja muito rico em ruído ultra-sónico, deverá usar-se as seguintes técnicas:

- Sensibilidade: reduzir a sensibilidade ao máximo, sem deixar de ouvir os ultrasons do equipamento a ensaiar;
- Sonda de foco de plástico: pode-se ajustar sobre o módulo de contacto/estetoscópio e escutar contra o ultra-som propagado no ar de concorrência;
- Trapo ou pano: o trapo ou pano é capaz de absorver o ultra-som intenso, quando o trapo se coloca correctamente sobre o módulo de contacto;
- Ajuste de frequência: por regra a frequência dos 30 kHz é a mais usada para a grande maioria das inspecções mecânicas.

Para a solução de um problema específico deve utilizar-se o módulo correcto e/ou os acessórios mais indicados para esse trabalho em particular. Isto pode incluir o módulo de contacto, as extensões, a sonda de plástico e inclusive o transdutor magnético. Deve-se utilizar a mesma frequência enquanto se comparam equipamentos semelhantes. Assegurar-se de quais os pontos de ensaio para a transmissão do som. Em caso de dúvida comparar os decibéis com equipamentos semelhantes. Também é possível gravar o som e analisar o problema com o software de análises espectral.

Para se ter exactidão e provas repetíveis, de forma a dar validade à inspecção deve ter-se em conta o seguinte:

- Observar o display do equipamento e reduzir ou incrementar a sensibilidade;
- Assegurar que a frequência é ajustável correctamente;
- Utilizar a sonda de plástico para ajudar a blindar e selar e evitar o deslizamento;
- O transdutor magnético também se pode utilizar;
- O ponto de medição onde se colocam os sensores deverá ser sempre o mesmo.

A inspecção por ultra-sons também permite inspeccionar muitos equipamentos num curto espaço de tempo. A tecnologia de ultra-sons também sobressai ao inspeccionar rolamentos com velocidade extremamente baixas.

Têm-se quatro categorias básicas de inspecção de rolamentos. Dependendo do objectivo, a inspecção pode ser tão fácil como caminhar até determinada peça do equipamento que se suspeita que tenha algum problema, escutar e verificar a existência da avaria.

Também o objectivo poderá ser analisar a tendência de um grupo específico de componentes críticos e observá-los, lubrifica-los quando é necessário, e poder tomar acções pertinentes quando mostram sinais de início da falha. Os métodos são os seguintes:

1-Qualidade Sonora: Um inspector pode determinar se o rolamento está com defeitos numa etapa incipiente da falha, através do som que este gera. Um rolamento em boas condições gera tipicamente “um ruído branco nítido”.

2-Comparação: Comparando peças semelhantes do equipamento o inspector pode perceber qual deveria ser o som normal do equipamento e assim poder identificar anomalias. O método de comparação utiliza-se para equipamentos semelhantes e com as mesmas condições de operação (RPM, carga, etc...). Os pontos de medição em cada equipamento devem ser os mesmos, utilizando os mesmos módulos e acessórios. O método de comparação é útil quando não se tem dados históricos e com este método é possível estabelecer as condições normais de funcionamento do equipamento. Pode ser efectuado para se desenhar a linha base para uma comparação posterior dos equipamentos. Este tipo de inspecção permite ter um diagnóstico rápido dos rolamentos dos equipamentos e basear-se na comparação da qualidade do som dos equipamentos em bom estado com os que, se suspeitam de conterem anomalias.

Procedimento a seguir para efectuar a inspecção por comparação:

- Usar o módulo de contacto e o transdutor magnético;
- Seleccionar a frequência desejada. Por regra a frequência dos 30 kHz é a mais apropriada;
- Seleccionar o ponto de prova onde está localizado o rolamento e marcar esse ponto;
- Para manter consistência, efectuar a avaliação sempre com o mesmo ângulo;
- Diminuir a sensibilidade até que o indicador esteja dentro da escala;
- Escutar o som do rolamento com os auriculares e escutar a qualidade do sinal para uma interpretação adequada;
- Seleccionar o mesmo tipo de rolamento que se encontram com a mesma velocidade de rotação e as mesmas condições de carga;
- Comparar as diferenças nas medições e na qualidade do som.

3-Tendências históricas: obtendo leituras no tempo e estabelecendo uma linha base para o equipamento, o inspector pode determinar se o rolamento está em bom estado, se necessita de lubrificação ou se apresenta defeitos e a sua gravidade (ver Figura 5.32). Quando se têm dados de tendência o inspector tem tempo para planear acções de manutenção. Este método permite desenvolver um programa fidedigno de lubrificação baseado nas medições de ultra-sons.

Quando se efectua o método histórico, deve-se seguir o seguinte:

- Seleccionar e marcar os pontos/localização de prova;
- Usar o módulo de contacto ou o sensor magnético;
- Ajustar a sensibilidade até que a operação mecânica do equipamento se escute claramente;
- Estabelecer o ângulo de inspecção (90° quando é possível);
- Seleccionar a frequência de inspecção (usualmente 30 kHz);
- Tocar a área do ensaio e escutar com os auriculares ao mesmo tempo que se observa os valores medidos;
- Gravar os resultados e as ondas de som;
- Registar os dB, nível de sensibilidade, frequência, data e hora;
- A primeira vez que se recolhem dados de um novo equipamento deve-se gravar o som da linha base.

Analisando a tendência no equipamento mecânico é a forma de detectar a taxa na qual ocorrem os eventos de deterioração. A base de este tipo de inspecção é a preservação dos seus registos e consistência. Deverá ser elaborado um procedimento, para que as medições ocorram sempre nas mesmas condições. A conservação dos registos das medições são necessários para a monitorização progressiva da condição dos equipamentos. A Tabela 5.1 apresenta os 3 níveis de acção.

Tabela 5.1 – Níveis de acção, adaptado (UE Systems inc, 2007).

| Níveis de Acção - (Por cima da leitura da linha de base) | |
|--|-----------------|
| (+) 8 dB | Lubrificação |
| (+) 16 dB | Defeito |
| (+) 35 dB | Defeito Extremo |

Os estados de intervenção baseiam-se numa linha base do rolamento. Em outras palavras, a linha base refere-se à leitura inicial do rolamento (assumindo que o rolamento está em bom estado, ou que é considerado adequado para este tipo de rolamento). Uma vez fixados os dB para a linha base, o inspector analisa o aumento dos decibéis relativamente à linha base para verificar o estado do rolamento, e eleger as acções correctivas caso sejam necessárias.

Lubrificação 8 dB: se ultrapassar a linha base em 8 dB, é apropriado lubrificar o rolamento para que ele regresse à linha base;

Dano 16 dB: esta é uma fase incipiente de defeito no rolamento. Quando esta fase evoluiu os defeitos aumentam e as frequências de defeitos começam a aparecer também.

Dano 35 dB: o aceleração da falha começou e o nível de som é tão elevado que se torna audível e a temperatura do rolamento aumenta. É uma fase crítica e perigosa pelo que se deverá proceder à substituição do rolamento o quanto antes.

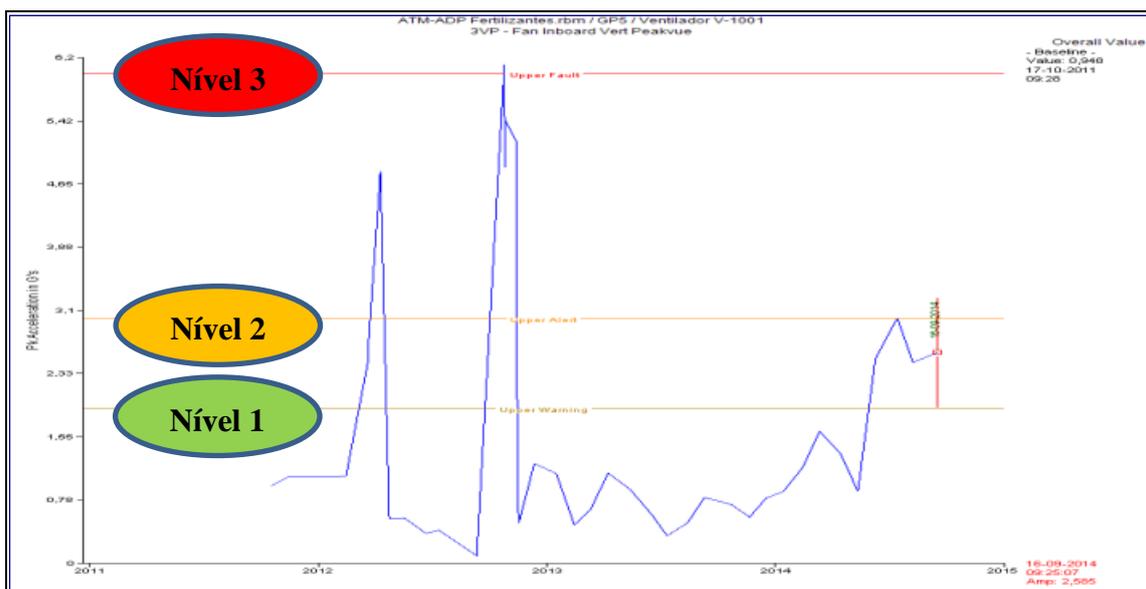


Figura 5.34 – Exemplo de uma curva de tendência.

4-Análise com software: Podem-se identificar os defeitos, com a análise do espectro e forma de onda no tempo. Mediante o uso de equações simples, que são apresentadas na Tabela 5.2, pode-se calcular de forma rápida e as frequências de defeito.

Tabela 5.2 – Equações aproximadas para cálculo das frequências de defeito

| Equações de frequência de defeito | |
|--|---|
| Pista Externa | $0.60 \times \text{\#esferas} \times \text{RPM} / 60$ |
| Pista Interna | $0.40 \times \text{\#esferas} \times \text{RPM} / 60$ |
| Elementos Rolantes | $2.6 \times \text{RPM} / 60$ |
| Gaiola | $0.41 \times \text{RPM} / 60$ |

5.7.2 Lubrificação

Só 9% dos rolamentos trabalham o suficiente para alcançarem a vida para a qual foram projectados, sendo que as principais causas de falha são a lubrificação e montagem incorrecta. É importante pois, considerar a lubrificação como um factor vital na manutenção dos rolamentos. Os ultra-sons são uma técnica poderosa para ajudar a cumprir de forma correcta a lubrificação de rolamentos, pela medição dos níveis sonoros como indicado na Tabela 5.1.

Para evitar a lubrificação inadequada:

- À medida que a película de lubrificante reduz, o nível de som incrementa. Um aumento de aproximadamente 8 dB na linha base poderá indicar falta de lubrificação;
- Ao lubrificar, colocar só o lubrificante necessário para reduzir o nível de som até aos valores da linha de base;
- Alguns lubrificantes necessitam de algum tempo para começarem a lubrificar adequadamente. Por esse motivo, lubrificar em poucas quantidades de cada vez;
- Há que ter em conta que o lubrificante frio pode mascarar os defeitos do rolamento danificado por um curto período de tempo. É uma boa prática esperar cinco minutos (esperar que o lubrificante aqueça) e depois voltar a verificar o estado do rolamento.

5.7.3 Inspeção Mecânica de rolamentos de telas transportadoras

Quando o contacto não é possível para o equipamento a inspeccionar, utiliza-se o módulo de varrimento com a sonda de foco de borracha. Este método em particular utiliza-se principalmente com os sistemas de telas de transporte, onde há numerosos rolamento de difícil acesso e/ou se gastaria demasiado tempo para fazer a medição por contacto com o rolamento. Mediante as medições de ultra-sons transmitidos no ar, o inspector pode identificar rapidamente os rolamentos que se encontram num estado danificado. Os procedimentos para este tipo de inspeção são:

- Usar o método “grande a fino”;
- Ajustar a frequência (40kHz), já que é um método de captar um ultra-som transmitido no ar;
- Criar uma distância de inspeção e um ângulo para assegurar a repetibilidade;
- Escutar o som mais forte dos rolamentos e localizar com a sonda de foco de plástico;

Por fim, deve-se ser consistente para ter confiabilidade e repetibilidade na inspeção.

6. CASOS DE ESTUDO

6.1 Introdução

No presente capítulo é feita uma exposição dos casos estudados, utilizando as metodologias apresentadas anteriormente, bem como a análise dos resultados obtidos.

Apresentam-se várias fotografias que pretendem ilustrar os equipamentos utilizados bem como as metodologias empregues, para que seja possível uma melhor visualização do trabalho efectuado.

Posteriormente são apresentados os resultados obtidos, para a análise dos ultra-sons e vibrações no controlo de condição. Para tal, foram efectuados dois casos de estudo distintos que se passam a explicar:

- **Caso de Estudo 1 – Programa de controlo de condição em ambiente industrial:** efectuaram-se medições de vibrações e ultra-sons em várias chumaceiras de rolamentos para os seguintes equipamentos (as referências dadas aos equipamentos são as instituídas pela empresa industrial):
 - Ventilador V1001;
 - Ventilador V233;
 - Ventilador V361a;

As medições foram efectuadas no âmbito da prestação de serviços de controlo de condição em cliente industrial da DatAnálise, com o objectivo de verificar a condição das máquinas/equipamentos. Desta forma foram efectuadas 2 campanhas de medições de vibrações e ultra-sons, a primeira decorreu no dia 16-09-2014 e a segunda a 23-10-2014, nas mesmas máquinas/equipamentos.

No decorrer deste intervalo de tempo, houve uma paragem programada onde se substituíram os rolamentos e chumaceiras no Ventilador V1001 e os rolamentos no Ventilador V233 uma vez que estes equipamentos apresentavam já valores consideráveis de vibração, diagnosticados, identificados e comunicados ao cliente industrial da DatAnálise.

- **Caso de Estudo 2 – modelo didáctico com simulação de defeitos em rolamentos:** as medições em modelo didáctico consistiram em utilizar um modelo físico, simulador de defeitos em rolamentos. Foram utilizados 3 rolamentos iguais (ou seja, do mesmo fabricante e modelo) mas em diferentes estados de condição, de acordo com o seguinte:
 - O primeiro rolamento foi assumido como estando em perfeitas condições, portanto sem qualquer tipo de defeito introduzido;
 - O segundo rolamento tinha um defeito da pista interna;
 - O terceiro rolamento um defeito em um dos elementos rolantes (rolo).

O objectivo deste ensaio é recolher em ambiente controlado vários sinais vibratórios e de ultra-sons de forma a permitir entender com alguma profundidade como se correlacionam os defeitos detectados com a análise de vibrações e com a análise do sinal de ultra-sons, uma vez que se conhecem os defeitos dos rolamentos ensaiados

Para as medições de vibrações foi usado o equipamento CSI 2130 da Emerson, e para os ultra-sons foi utilizado o equipamento UltraProbe 9000 da EU Systems, apresentados na secção 6.2.

Em termos de tratamento, análise e diagnóstico dos dados, para as vibrações foi usado o software AMS Suite da Emerson. Para os dados de ultra-sons, uma vez que o modelo do equipamento usado ainda não possui a capacidade de gravar o sinal, utilizou-se a plataforma de programação gráfica LabView, onde se criaram duas aplicações: uma para aquisição do sinal; e uma segunda para tratamento e análise dos dados. A aplicação de aquisição utiliza a placa de som do computador para receber o som via auscultadores do Ultraprobe 9000. A aplicação para tratamento e análise dos dados lê os ficheiros .wav gravados com recurso à aplicação de aquisição e procede ao tratamento do sinal no tempo por forma a se conseguir ter o espectro de frequência do sinal, entre outros parâmetros essenciais para análise e diagnóstico dos dados.

6.2 Equipamentos de medição

Os dados de vibração e de ultra-sons, recolhidos na parte experimental do presente trabalho, foram obtidos utilizando os seguintes equipamentos:

- **Para medição dos ultra-sons:** Ultraprobe 9000 da UE Systems;
- **Para medição das vibrações:** CSI 2130 da Emerson.

6.2.1 Equipamento de ultra-sons – Ultraprobe 9000 da EU Systems

O equipamento utilizado para as medições de ultra-sons foi o modelo Ultraprobe 9000 da UE Systems, apresentado na Figura 6.1. As especificações técnicas do equipamento podem ser consultadas no Anexo I.



Figura 6.1 – Equipamento usado nas medições de ultra-sons: Ultraprobe 9000.

Este equipamento é constituído por uma série de sensores (módulos) que são usados conforme o tipo de inspecção que se pretende efectuar, sendo sempre necessário utilizar

os auriculares para se ouvir o tipo de som de funcionamento da máquina/equipamento (ver Figura 6.2).

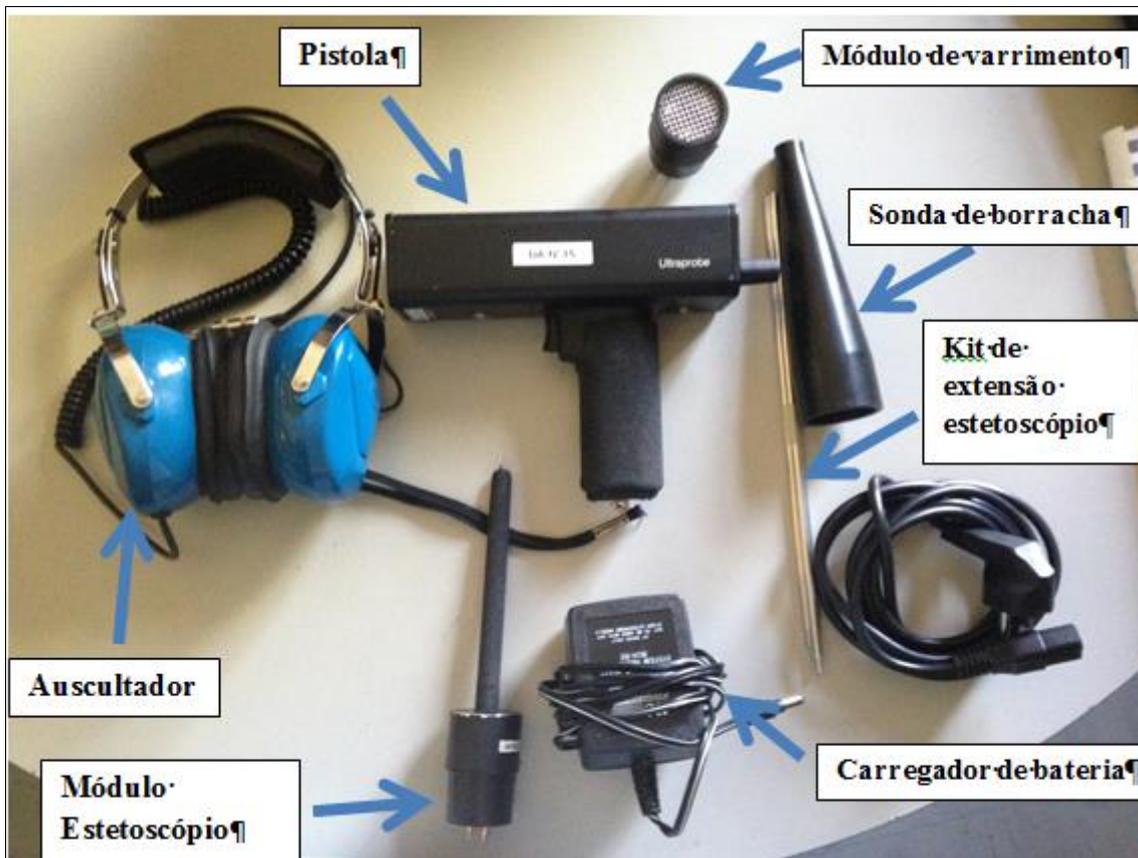


Figura 6.2 - Componentes do equipamento – Ultraprobe 9000.

Como já foi dito anteriormente, este equipamento possui uma série de sensores para cada tipo de inspeção. No âmbito da realização deste trabalho, o sensor utilizado foi o módulo de contacto (estetoscópio), representado na Figura 6.3. Este módulo é constituído por uma vara de metal que serve como guia de ondas dos ultra-sons gerados nos equipamentos, como por exemplo, dentro de uma chumaceira, permitindo ouvir o “trabalhar” do rolamento. Este é o módulo mais adequado para inspeções mecânicas e muito especificamente para análise de chumaceiras e rolamentos.



Figura 6.3 – Módulo de contacto (estetoscópio).

6.2.2 Analisador de Vibrações – CSI 2130 da Emerson

O equipamento de medição e recolha de vibrações é o modelo CSI 2130 da Emerson, apresentado na Figura 6.4, e cujas características podem ser consultadas com mais detalhe no Anexo II.



Figura 6.4 - Analisador de Vibrações - CSI 2130 da Emerson.

Quanto ao transdutor utilizado, o acelerómetro A0760GP da Emerson (Figura 6.5), foi fixado nas chumaceiras através de uma base magnética (Figura 6.5). A ficha técnica do acelerómetro pode ser consultada no Anexo III.



Figura 6.5 – Acelerómetro usado na recolha de dados: A0760GP.

6.3 Caso de Estudo 1 - Programa de controlo de condição em ambiente industrial

Os dados foram recolhidos após elaboração de uma rota de aquisição no software instalado num PC portátil específico e que depois foi transferida para o aparelho. A criação dessas rotas, não faz parte do âmbito deste estudo. Assim, foi utilizada uma rota já existente, criada anteriormente pela empresa DatAnálise, Lda., no âmbito do contrato de prestação de serviços existente com o seu cliente. Essa rota já instituída foi também adoptada para as medições de ultra-sons. Recolhidos os dados, estes foram exportados para o PC. A partir desta transferência podem ser utilizados vários tipos de configuração no armazenamento de dados e serem seleccionadas várias técnicas para o tratamento dos mesmos.

Foi estabelecido que os dados seriam recolhidos em dois pontos (P3 e P4) dos equipamentos alvo da avaliação, conforme assinalados na Figura 6.6. Esta selecção tem como critério a localização das chumaceiras, onde se pretende avaliar a condição dos rolamentos. A direcção vertical foi a definida para recolher a informação, tanto para as vibrações como para os ultra-sons. Esta escolha deveu-se ao facto de que para os ultra-sons o melhor local para recolher informação é colocando a sonda estetoscópica (ou módulo de contacto) em cima do grassé de lubrificação pois será neste local que os níveis sonoros serão mais elevados (“caminho” de fuga).

Os dados foram recolhidos, como por exemplo, se demonstra nas Figuras 6.7 e 6.8 nos pontos P3 e P4, tanto para os ultra-sons como para as vibrações. Os equipamentos apresentados nas secções 6.3.1 a 6.3.3 encontravam-se a funcionar normalmente. Após a recolha, os dados de vibração são transferidos para o computador e armazenados na base de dados. Quando se procede a essa transferência, é possível escolher quais os parâmetros que se pretendem analisar, bem como as suas unidades. Neste caso, retiraram-se os espectros de frequência para o parâmetro PeakVue, para verificar quais os rolamentos que apresentavam defeitos e que tipo de defeito.

Para os ultra-sons, foram gravados os níveis sonoros (nível global em dB) bem como a referência da frequência usada, que para este tipo de inspecção a mais indicada são os 30 kHz (ver Figura 6.9). Este modelo de equipamento ainda não tem a opção para gravar o sinal, para posterior visualização e tratamento. Pelo que se desenvolveram as já descritas aplicações computacionais em LabVIEW.

Seguem-se os resultados das medições efectuadas para as vibrações e ultra-sons das máquinas/equipamentos avaliados.

A apresentação dos resultados das medições efectuadas de vibrações e ultra-sons nos dias 16 de Setembro (1.^a campanha) e 23 de Outubro de 2014 (2.^a campanha) são apresentados nos pontos seguintes com a seguinte estrutura para cada um dos equipamentos avaliados:

- Breve abordagem do equipamento;
- Resultado das medições da 1.^a campanha;
- Resultado das medições da 2.^a campanha;
- Comparação dos resultados de ambas as campanhas;

E por fim, é efectuada a análise geral ao conjunto de resultados obtidos para ambas as campanhas de medição.

6.3.1 Equipamento: Ventilador V1001

A Figura 6.6 ilustra o equipamento V1001. Neste equipamento foram efectuadas medições de vibrações e ultra-sons nos pontos P3 e P4.

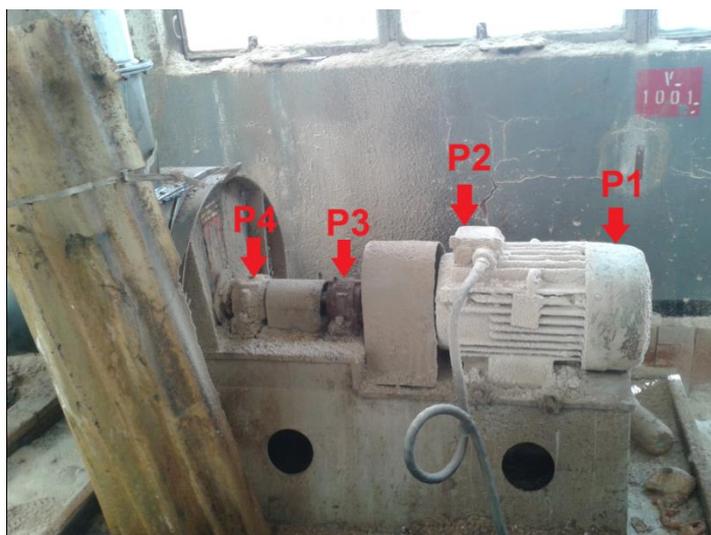


Figura 6.6 – Equipamento: Ventilador V1001 com indicação dos pontos de medida.

A medição das vibrações no ponto P3 está ilustrada na Figura 6.7:



Figura 6.7 - Colocação do acelerómetro no ponto P3 para medição das vibrações.

A colocação do equipamento de ultra-sons no ponto P3 e P4 está representado na Figura 6.8. a) e b) respectivamente.



Figura 6.8 - Colocação do Ultraprobe 9000 para medição no ponto P3 e P4.

Na figura 6.9, apresenta-se um exemplo de como o equipamento apresenta os resultados.



Figura 6.9 - Visualização do display do equipamento de ultra-sons.

Os resultados obtidos nas medições efectuadas de vibrações e ultra-sons nos dias 16 de Setembro (1ª campanha) e 23 de Outubro de 2014 (1ª campanha) são apresentados nos pontos seguintes.

6.3.1.1 Resultados das medições da 1.ª campanha V1001

As Figura 6.10 e 6.11 apresentam os espectros de frequência obtidos para os pontos P3 e P4, respectivamente. Os resultados das medições de ultra-sons são os apresentados na Tabela 6.1.

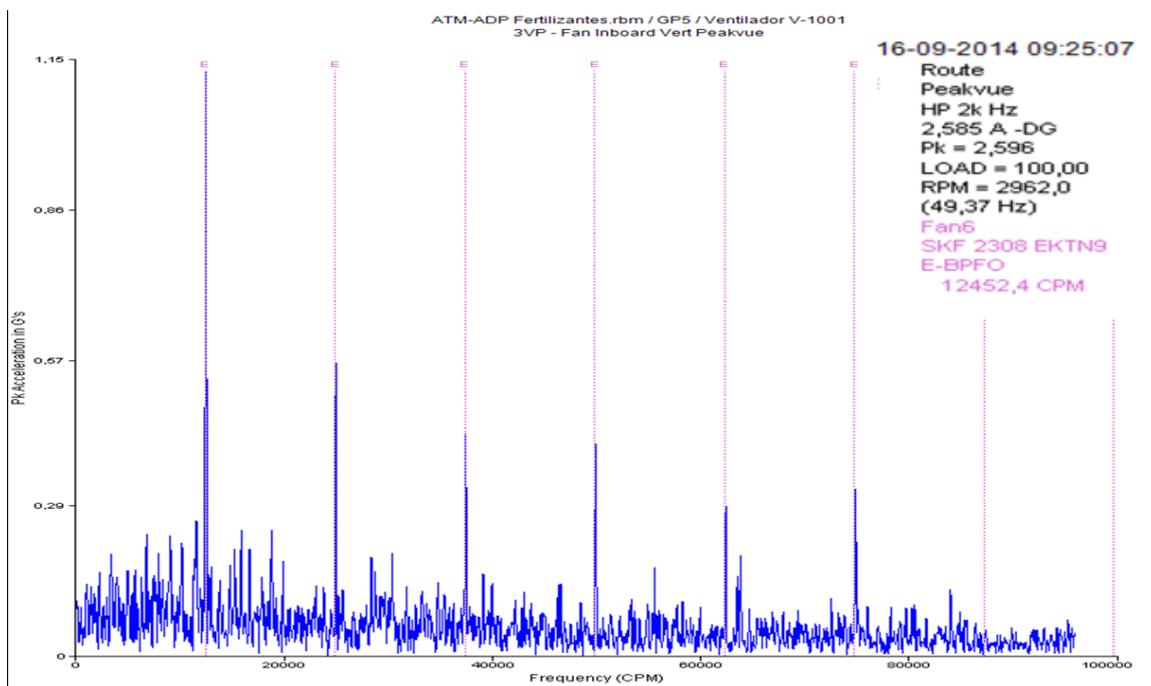


Figura 6.10 - Espectro de frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V1001.

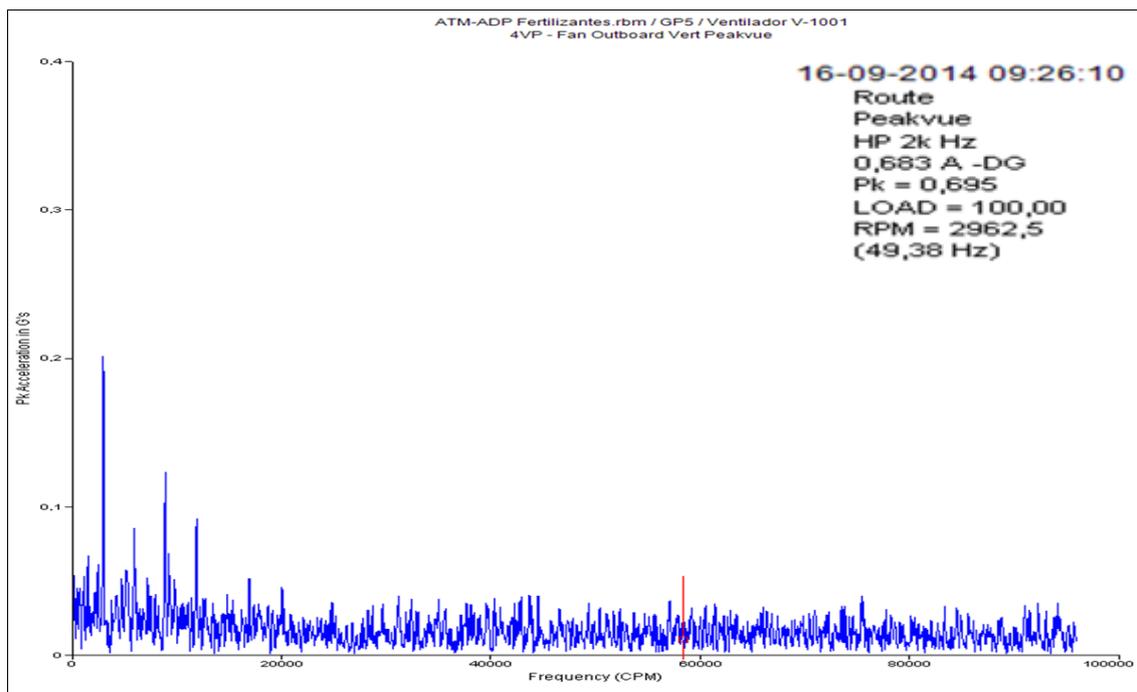


Figura 6.11 - Espectro de frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V1001.

Tabela 6.1 - Níveis sonoros de ultra-sons medidos na 1.ª campanha - V1001.

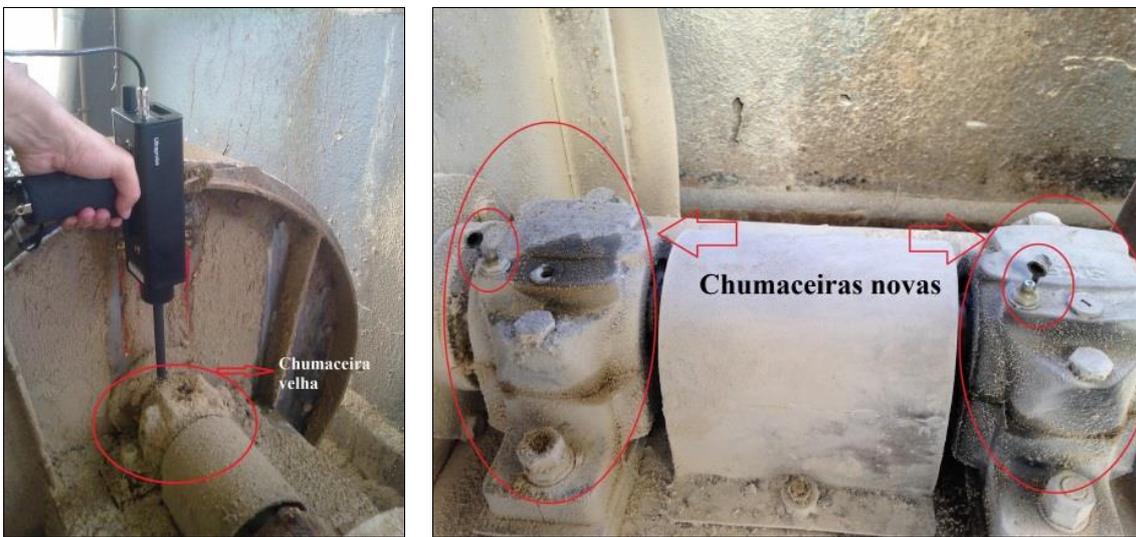
| Ponto de medição | Data da avaliação | 16-09-2014 |
|------------------|---------------------|------------|
| P3 | Memória de gravação | 14 |
| | Nível sonoro | 79 dB |
| | Frequência | 30 kHz |
| P4 | Memória de gravação | 15 |
| | Nível sonoro | 77 dB |
| | Frequência | 30 kHz |

Da Figura 6.10 é evidente o defeito na pista externa do rolamento do Ponto P3 (amplitude $P_k=1.15$ G's para uma BPFO =12452.4 rpm e harmónicas indicam que o defeito é bastante acentuado), pelo que se aconselha a que o mesmo seja substituído. Por outro lado o espectro da Figura 6.11 relativo ao ponto P4, não evidência qualquer defeito. No entanto, o nível global de ultra-sons adquirido não permite de forma evidente afirmar que o rolamento do Ponto P3 está num estado de degradação bastante mais avançado que o do Ponto P4 (Tabela 6.1) (79 dB e 77 dB respectivamente).

6.3.1.2 Resultados das medições da 2.^a campanha V1001

As Figuras 6.13 e 6.14 apresentam os espectros de frequência obtidos para os pontos P3 e P4 respectivamente. Os resultados das medições de ultra-sons são os apresentados na Tabela 6.2.

Entre a primeira e a segunda campanha, o equipamento foi intervencionado ao nível da substituição das chumaceiras e rolamentos. As fotografias que seguem demonstram o aspecto da chumaceira velha (Figura 6.12 a) e da nova (Figura 6.12 b) após a intervenção.



a) Chumaceira velha

b) Chumaceiras novas

Figura 6.12 – Comparação entre o aspecto das chumaceiras velhas e as novas.

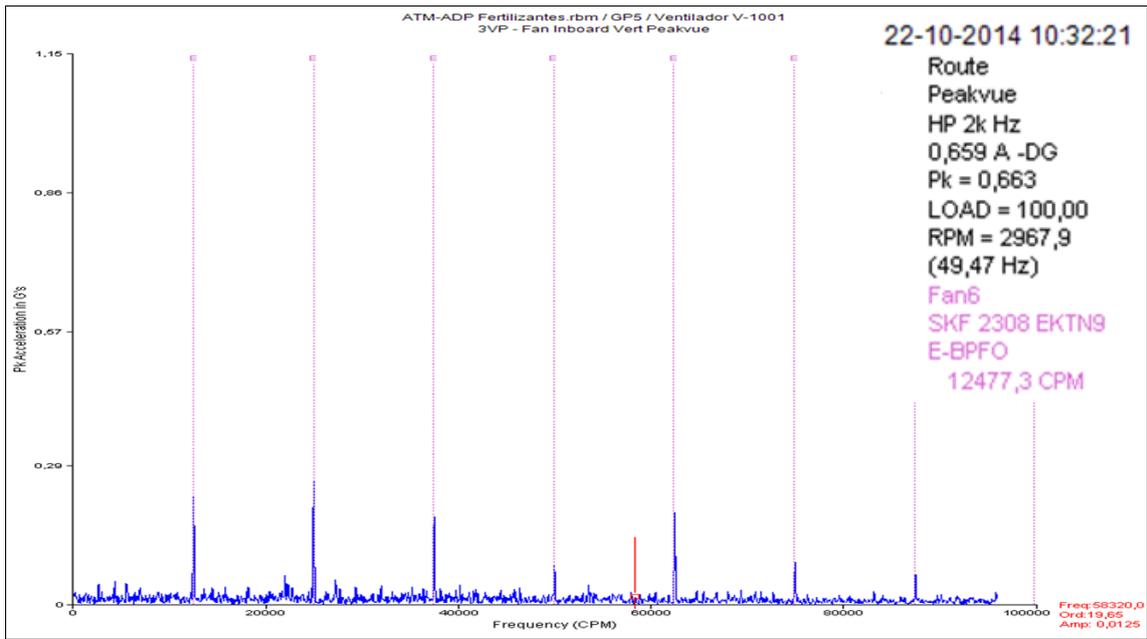


Figura 6.13 - Espectro de frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V1001.

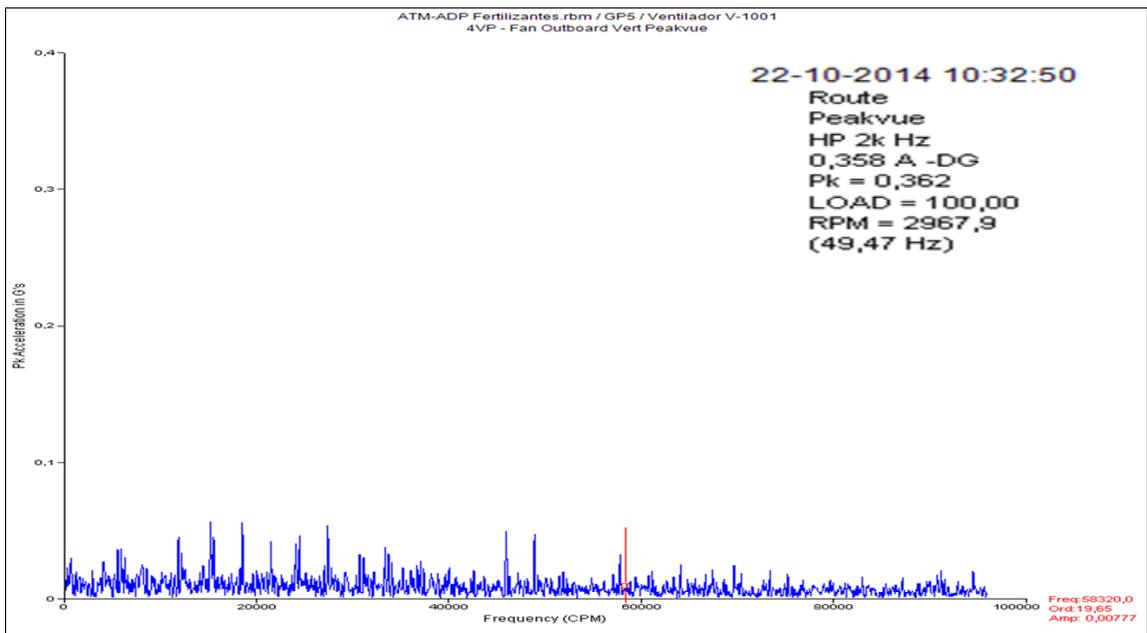


Figura 6.14 - Espectro de frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V1001.

Tabela 6.2 - Níveis sonoros de ultra-sons medidos na 2.^a campanha - V1001.

| Ponto de medição | Data da avaliação | 23-10-2014 |
|------------------|---------------------|------------|
| P3 | Memória de gravação | 50 |
| | Nível sonoro | 72 dB |
| | Frequência | 30 kHz |
| P4 | Memória de gravação | 51 |
| | Nível sonoro | 70 dB |
| | Frequência | 30 kHz |

Analisando o espectro de vibrações do ponto P3 (Figura 6.13) verifica-se que o rolamento continua a apresentar defeito na pista do anel externo. A amplitude na BPFO e harmônicas indicam que o defeito ainda é muito incipiente (amplitude $P_k=0.25$ G's a 12480 rpm).

Do espectro de vibrações para o ponto P4 (Figura 6.14) verifica-se que nenhuma das frequências coincide com as frequências de defeito. Pelos valores de amplitude apresentados no espectro também se pode concluir que não há motivos para alarmes.

Ao nível do nível global dos ultra-sons, há uma redução entre os níveis sonoros da 1.^a e 2.^a campanhas (Tabelas 6.1 e 6.2). No entanto, a diferença entre os níveis globais para os Pontos P3 e P4 continua a não evidenciar a diferença de estado dos respectivos rolamentos.

6.3.1.3 Comparação dos resultados das duas campanhas V1001

As Figuras 6.15 e 6.16 apresentam a comparação entre os espectros da 1.^a e 2.^a campanha (a verde e a azul respectivamente). Na Figura 6.17 são de igual forma apresentados os níveis sonoros de ultra-sons medidos antes e depois.

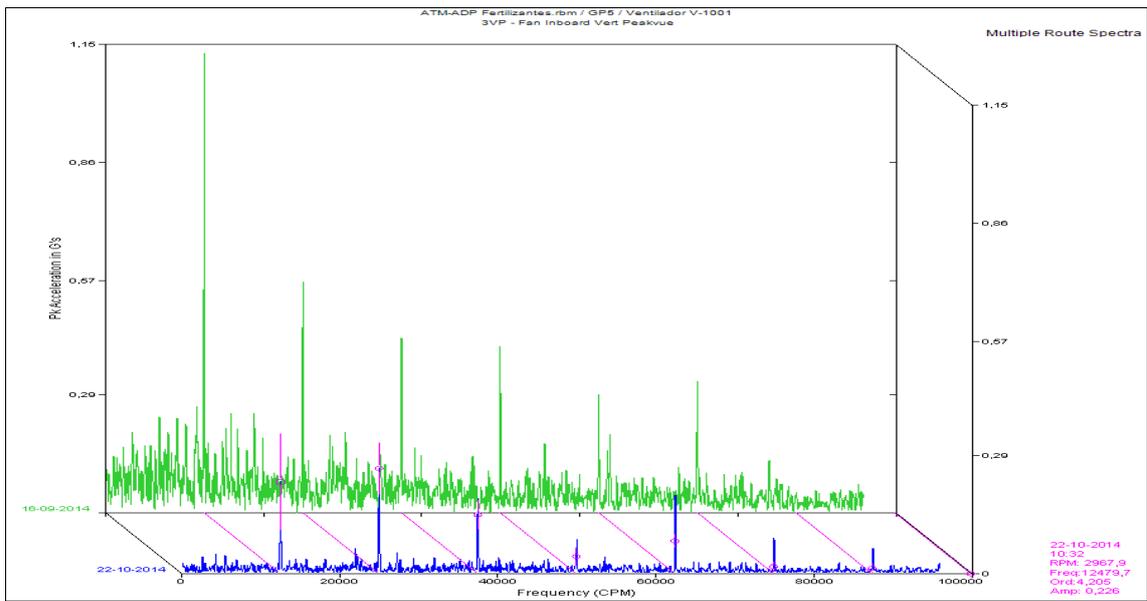


Figura 6.15 – Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V1001.

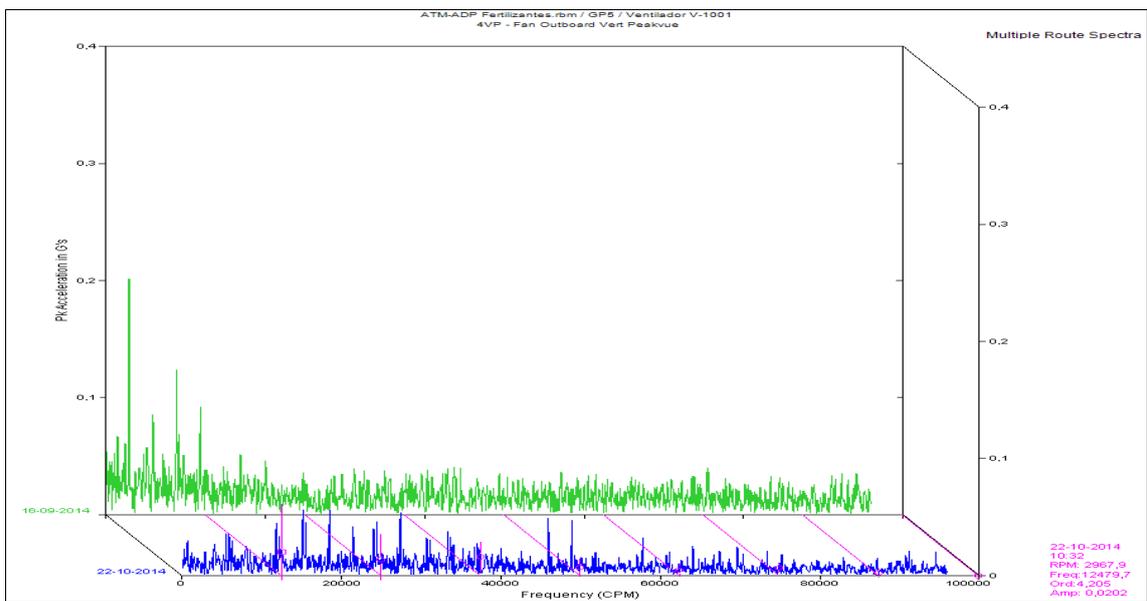


Figura 6.16 - Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V1001.

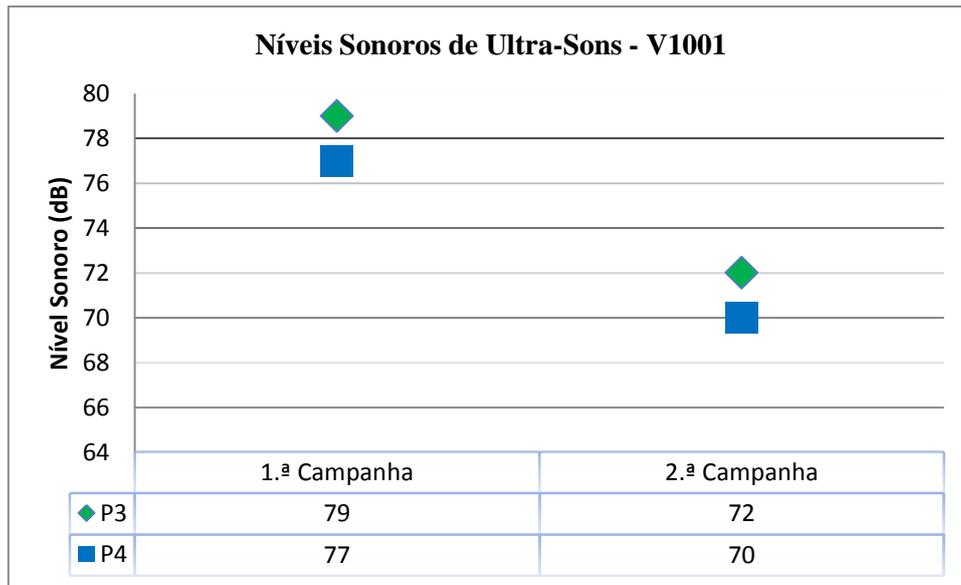


Figura 6.17 - Comparação dos níveis sonoros de ultra-sons medidos nas duas campanhas - V1001.

6.3.1.4 Análise dos resultados das campanhas efectuadas V1001

Aquando da realização da 2.ª campanha, o equipamento ventilador V1001 tinha sido intervencionado no âmbito do programa de manutenção condicionada. Foram substituídos os rolamentos e as chumaceiras dos pontos P3 e P4.

Constata-se que os valores para o ponto P3 entre a primeira campanha e a segunda baixaram significativamente (amplitude $P_k=1.15$ G's a 12452.4 rpm para uma amplitude $P_k=0.25$ G's a 12480 rpm). No entanto, e apesar de o rolamento e da chumaceira serem novos, apresentam já frequências de defeito na pista do anel externo. Segundo informação do técnico responsável pelo programa de controlo de condição, esta situação já se verificou no passado. Pode-se concluir, que muito possivelmente o técnico que efectua a substituição deste rolamento por algum motivo o coloca de forma incorrecta, danificando-o. Os níveis sonoros de ultra-sons baixaram consideravelmente passando de 79 dB para 72 dB.

Quanto ao ponto P4, apesar de em ambas as campanhas não evidenciar frequências relacionadas com defeitos em rolamentos, é possível verificar que com a colocação de uma nova chumaceira e rolamento os valores de amplitude também baixaram consideravelmente. Quanto às medições de ultra-sons, estas acompanharam o mesmo

nível de decaimento em dB que o ponto P3, ou seja, os níveis sonoros passaram de 77 dB para 70 dB, ou seja, uma redução de 7 dB como aconteceu no ponto P3.

6.3.2 Equipamento: Ventilador V233

Este equipamento da Figura 6.18, o Ventilador V233, com os pontos de medida indicados, apresenta os rolamentos P3 e P4 iguais, e havia a suspeita de que o rolamento em P4 estava a começar a apresentar problemas, visto que em avaliações anteriores se começou a detectar um aumento dos níveis de vibração.

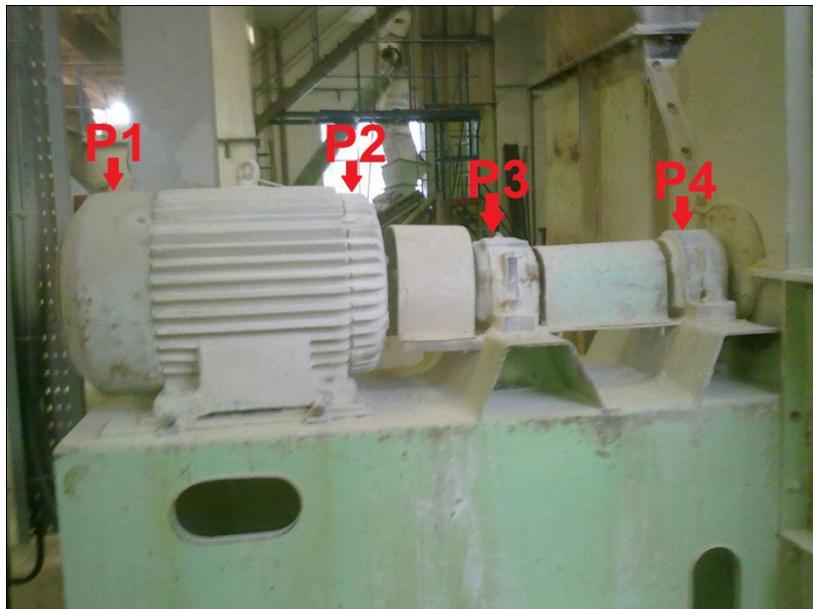


Figura 6.18 – Equipamento: Ventilador V233, com indicação dos pontos de medida.

A colocação do analisador de ultra-sons nos pontos P3 e P4 está representado na Figura 6.19.



a) Medição no ponto P3



b) Medição no ponto P4

Figura 6.19 - Colocação do Ultraprrobe 9000 para medição nos pontos P3 e P4 – V233

6.3.2.1 Resultados das medições da 1.^a campanha V233

Os resultados relativos à 1.^a campanha de medição no equipamento V233 encontram-se nas Figuras 6.20 e 6.21 e na Tabela 6.3.

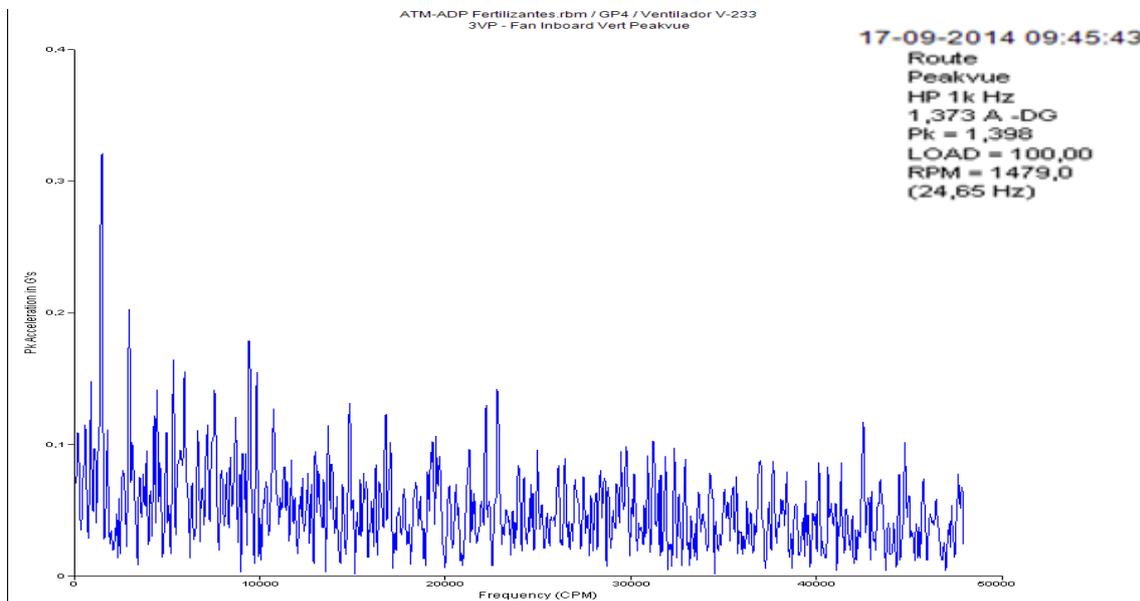


Figura 6.20 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V233.

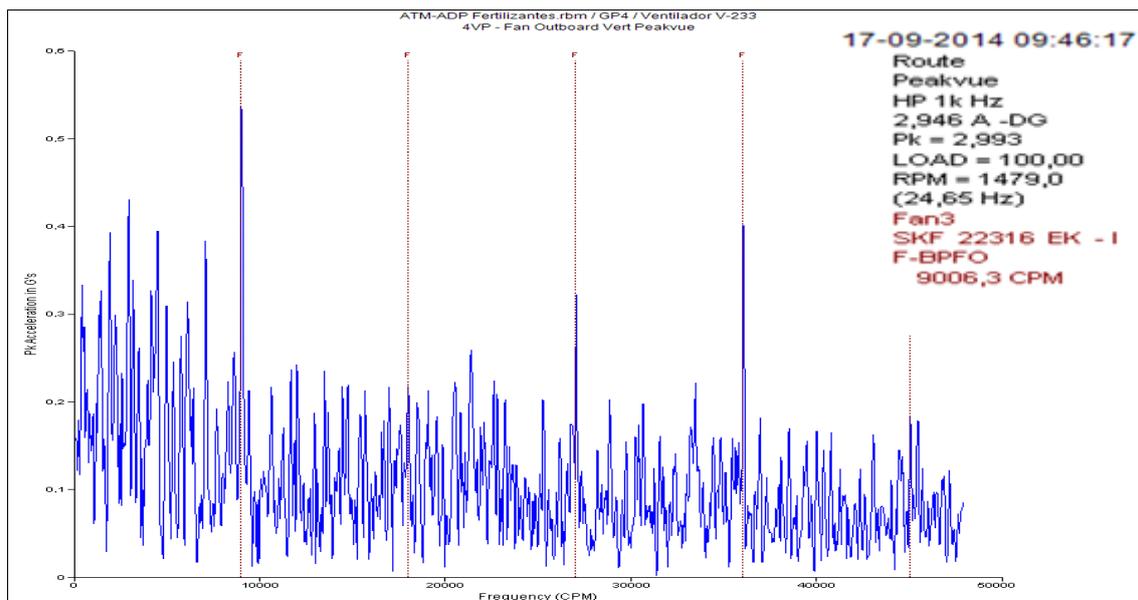


Figura 6.21 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V233.

Tabela 6.3 - Níveis sonoros de ultra-sons medidos na 1.ª campanha – V233.

| Ponto de medição | Data da avaliação | 16-09-2014 |
|------------------|---------------------|------------|
| P3 | Memória de gravação | 18 |
| | Nível sonoro | 66 dB |
| | Frequência | 30 kHz |
| P4 | Memória de gravação | 19 |
| | Nível sonoro | 75 dB |
| | Frequência | 30 kHz |

De acordo com os espectros de vibração o Ponto P3 (figura 6.20) não evidencia frequências relacionadas com defeitos no rolamento, enquanto o ponto P4 (Figura 6.21) apresenta frequências de defeito na pista do anel externo (amplitude $P_k=0.55$ G's a 9006.3 rpm). A amplitude das referidas frequências (BPFO e harmónicas) indicam que o defeito já tem alguma expressão, no entanto ainda não se justifica a sua substituição.

Da avaliação efectuada com o equipamento de ultra-sons, verifica-se que para o ponto P3 temos um valor de nível sonoro de 66 dB e para o ponto P4 temos um valor de 75 dB. Este valores vão de acordo com os resultados obtidos na análise das vibrações, ou seja, que o rolamento do ponto P3 não apresenta frequências de defeito, enquanto que o rolamento do P4 apresenta defeitos na pista do anel externo, apesar de esta conclusão não poder ser resultado da análise de ultra-sons.

6.3.2.2 Resultados das medições da 2.^a campanha V233

Quanto à 2.^a campanha de medição no V233, as Figura 6.22 e 6.23 apresentam os espectros de frequência obtidos para os pontos P3 e P4, respectivamente. Os resultados das medições de ultra-sons são os apresentados na Tabela 6.4.

Entre a primeira e a segunda campanha, este equipamento foi intervencionado, tendo-se substituído os rolamentos dos pontos P3 e P4.

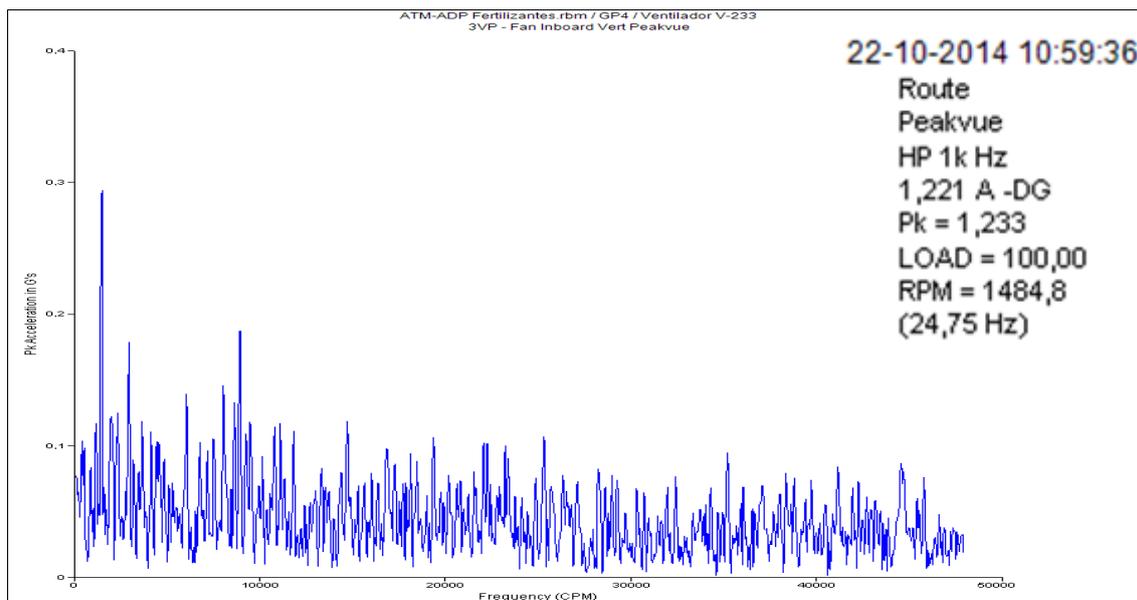


Figura 6.22 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V233.

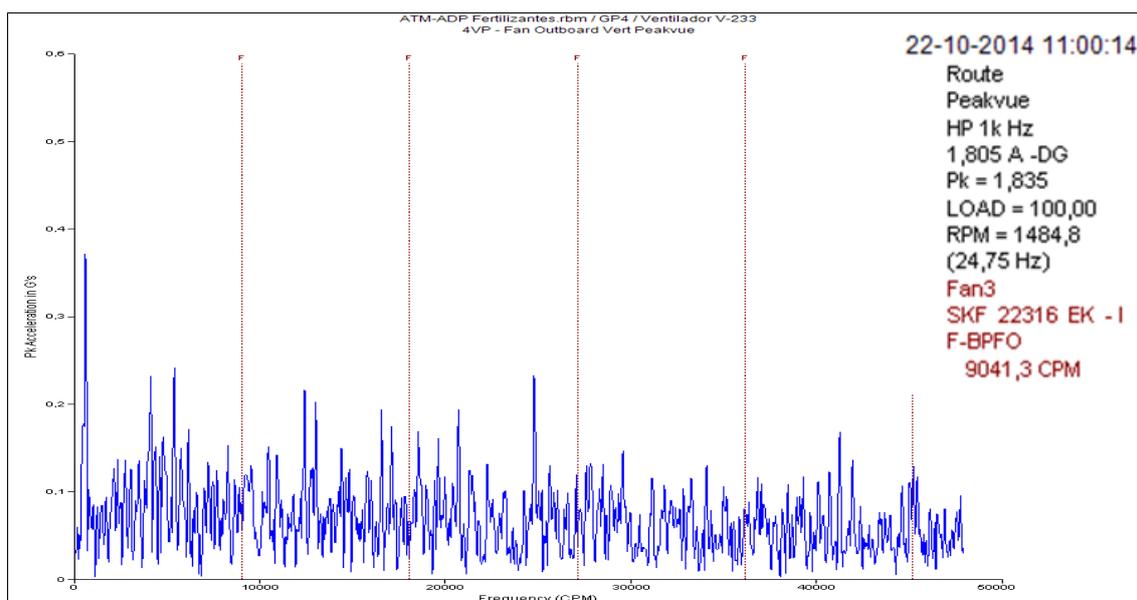


Figura 6.23 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V233.

Tabela 6.4 - Níveis sonoros de ultra-sons medidos na 2.^a campanha – V233.

| Ponto de medição | Data da avaliação | 23-10-2014 |
|------------------|---------------------|------------|
| P3 | Memória de gravação | 52 |
| | Nível sonoro | 70 dB |
| | Frequência | 30 kHz |
| P4 | Memória de gravação | 53 |
| | Nível sonoro | 78 dB |
| | Frequência | 30 kHz |

Analisando os espectros de vibrações dos pontos P3 (Figura 6.22) e P4 (Figura 6.23) verifica-se que os rolamentos não apresentam defeitos, e as amplitudes de vibração são baixas, como seria de esperar, uma vez que os rolamentos foram substituídos recentemente. Foram calculadas as várias frequências de defeito, mas não se identifica nenhuma nos espectros. Pode assim concluir-se que os rolamentos foram montados correctamente e que o conjunto dos vários órgãos constituintes do equipamento V233 está a funcionar correctamente. Quanto aos níveis sonoros obtidos nas medições de ultra-sons, verifica-se que houve um incremento dos valores em 4 dB para o ponto P3 e 3 dB para o ponto P4.

6.3.2.3 Comparação dos resultados das duas campanhas V361A

As figuras 6.24 e 6.25 apresentam a comparação entre os espectros das 1.^a e 2.^a campanhas. Na Figura 6.26 são de igual forma apresentados os níveis sonoros de ultra-sons medidos antes e depois da intervenção.

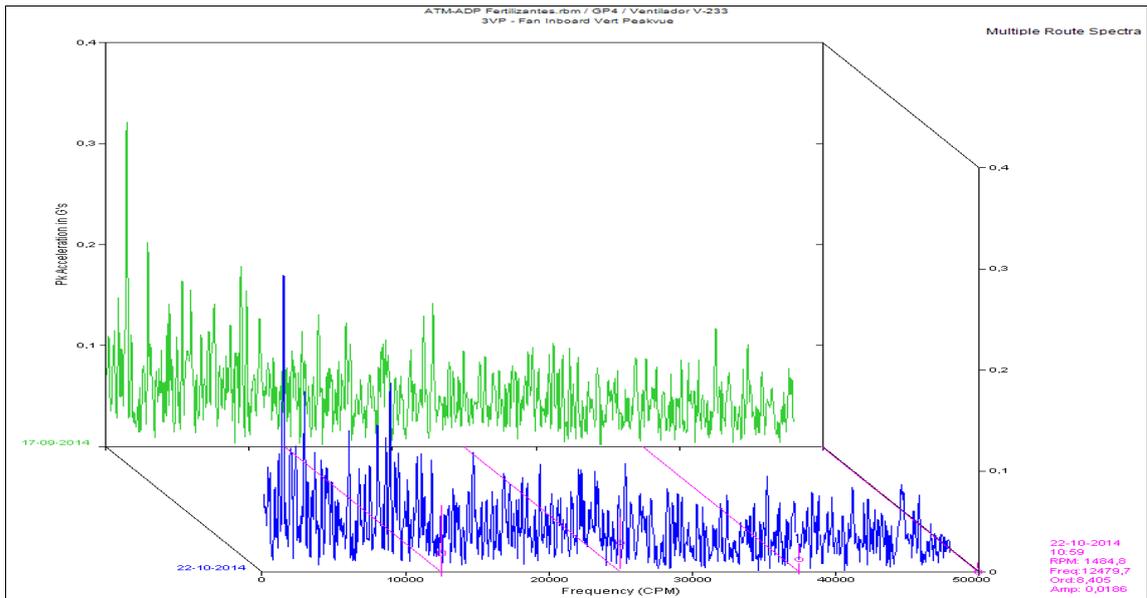


Figura 6.24 - Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V233.

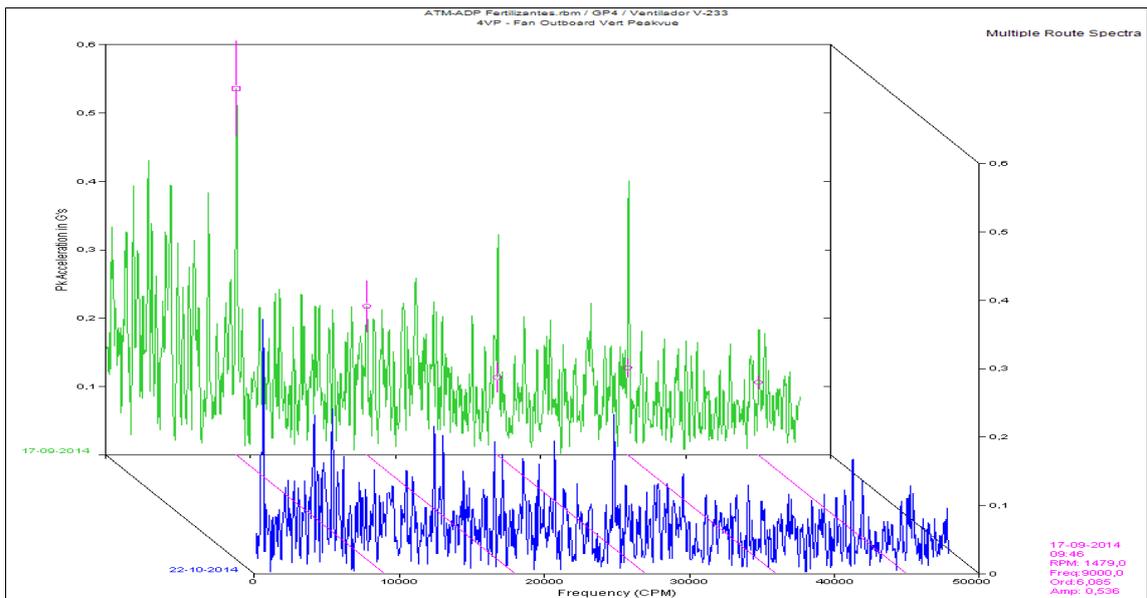


Figura 6.25 - Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V233.

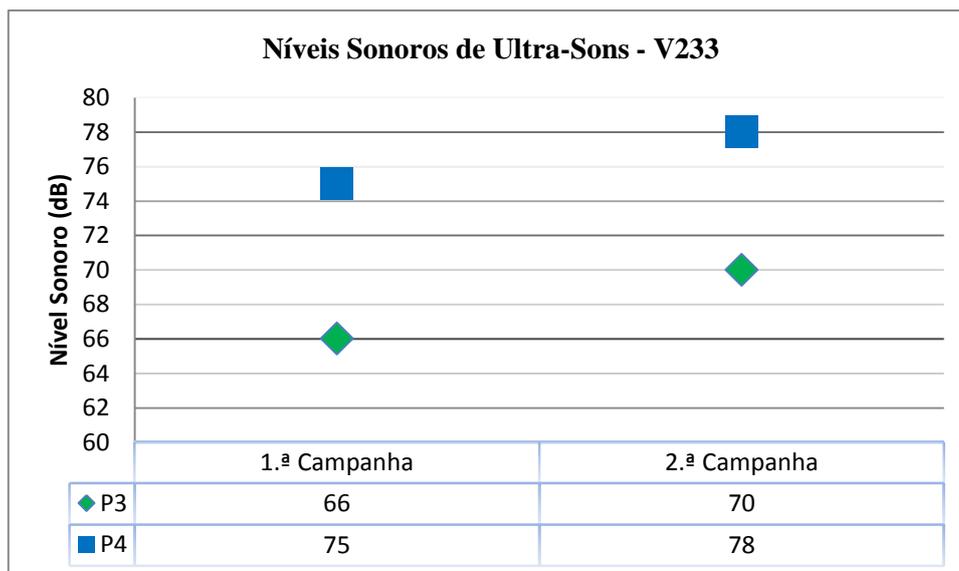


Figura 6.26 - Comparação dos níveis sonoros de ultra-sons medidos nas duas campanhas – V233.

6.3.2.4 Análise dos resultados das campanhas efectuadas no V233

O equipamento V233 foi também intervencionado entre a primeira e a segunda campanha de medições, à semelhança do V1001. Neste equipamento foram substituídos os rolamentos do P3 e P4.

A conclusão mais evidente foi a resolução do problema do rolamento do ponto P4 como se pode ver na Figura 6.25, em que os valores de amplitude para a BPFO e harmónicas passaram de $P_k=0.55G's$ a 9006.3 rpm para amplitude $P_k=0.19G's$ a 9041.3 rpm. Para o ponto P3 a amplitude baixou para todas as frequências (Figura 6.24) no entanto essas diferenças não são significativas, até porque o rolamento P3 não apresentava defeitos antes de ser substituído.

Ao nível dos valores dos ultra-sons, estes em vez de diminuírem, como seria espectável, aumentaram. Para o P3 tinha-se na primeira avaliação 66 dB passou para 70 dB e para o P4 tinha-se 75 dB e passou-se para os 78 dB. Ou seja, houve um incremento nos níveis sonoros de 4 dB e 3 dB, respectivamente. A justificação mais provável para este facto, é correlacionar que os níveis sonoros são dependentes de questões de lubrificação. O que leva a crer, que na primeira avaliação as chumaceiras estivessem com excesso de lubrificação atenuando e amortecendo quer os níveis sonoros quer os níveis de vibração. Uma outra justificação plausível, para explicar este facto, prende-se com o ajuste de

sensibilidade de equipamento. O ajuste é efectuado de forma manual, e mesmo seguindo as recomendações do fabricante para o seu ajuste, verificou-se na prática que para pequenas oscilações de ajuste tinham-se valores de nível sonoro diferentes (desvios verificados na ordem dos 2 dB).

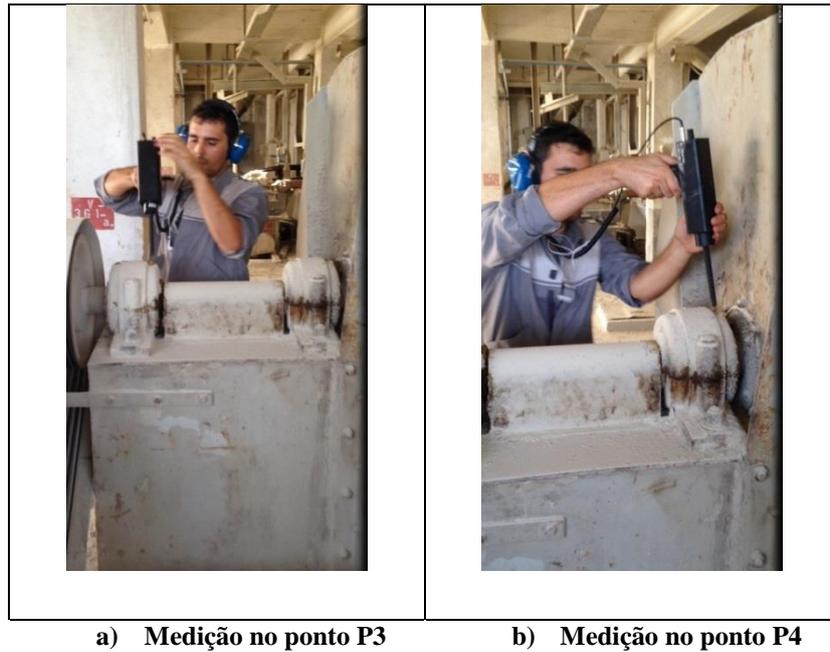
6.3.3 Equipamento: Ventilador V361A

A Figura 6.27 mostra o equipamento V361A, onde são indicados os pontos de medida. Neste equipamento foram efectuadas medições de vibrações e ultra-sons nos pontos P3 e P4.



Figura 6.27 - Equipamento: Ventilador V361A com indicação dos pontos de medida.

A colocação do equipamento de ultra-sons no ponto P3 e P4 está representada na Figura 6.28. a) e b), respectivamente.



a) Medição no ponto P3 b) Medição no ponto P4

Figura 6.28 - Colocação do Ultraprrobe 9000 para medição no ponto P3 e P4.

6.3.3.1 Resultados das medições da 1.^a campanha V361A

As Figura 6.29 e 6.30 apresentam os espectros de frequência obtidos para os pontos P3 e P4, respectivamente. Os resultados das medições de ultra-sons são os apresentados na Tabela 6.5.

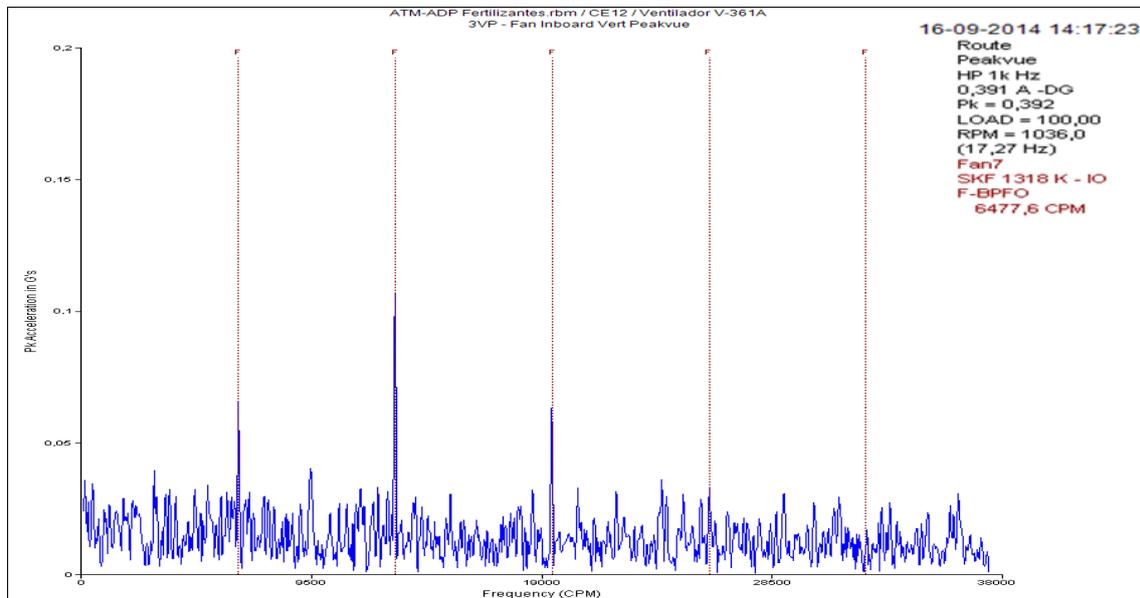


Figura 6.29 - Espectro de frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V361A.

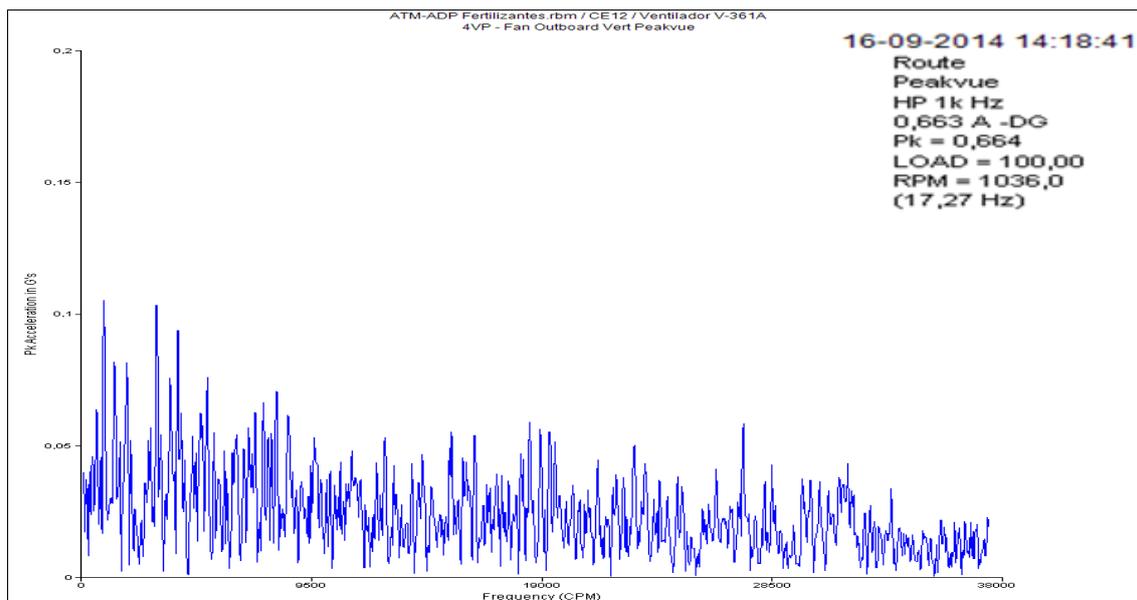


Figura 6.30 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V361A.

Tabela 6.5 - Níveis sonoros de ultra-sons medidos na 1.^a campanha – V361A.

| Ponto de medição | Data da avaliação | 16-09-2014 |
|------------------|---------------------|------------|
| P3 | Memória de gravação | 38 |
| | Nível sonoro | 54 dB |
| | Frequência | 30 kHz |
| P4 | Memória de gravação | 39 |
| | Nível sonoro | 54 dB |
| | Frequência | 30 kHz |

De acordo com os espectros das medições de vibrações para os pontos P3 e P4. (Figuras 6.29 e 6.30), pode concluir-se que o ponto P3 apresenta defeito na pista externa (BPFO=6477.6 rpm, com uma amplitude Pk=0.06 G's), ainda que numa fase muito incipiente, tendo em conta os valores de amplitude baixos, e respectivas harmónicas. Quanto ao ponto P4, não se evidenciam frequências de defeitos no rolamento. Os valores medidos para os níveis sonoros de ultra-sons, foram de 54 dB para ambos os pontos de medição.

6.3.3.2 Resultados das medições da 2.^a campanha V361A

As Figura 6.31 e 6.32 apresentam os espectros de frequência obtidos na 2.^a campanha de medição para os pontos P3 e P4, respectivamente. Os resultados das medições de ultra-sons são os apresentados na Tabela 6.6.

Entre a primeira e a segunda campanha, este equipamento não foi intervencionado.

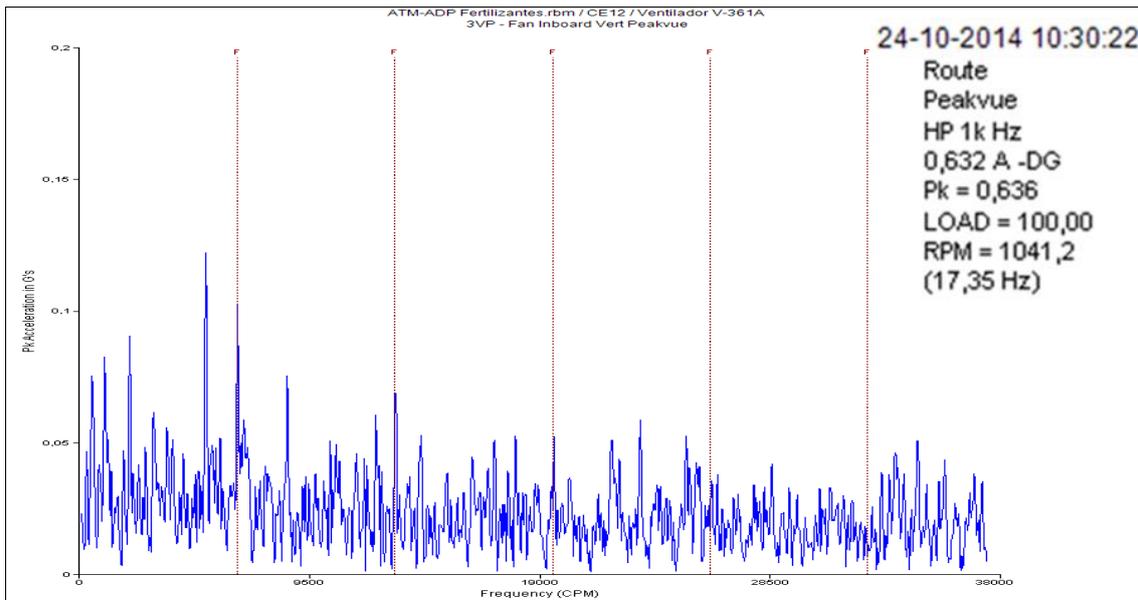


Figura 6.31 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V361A.

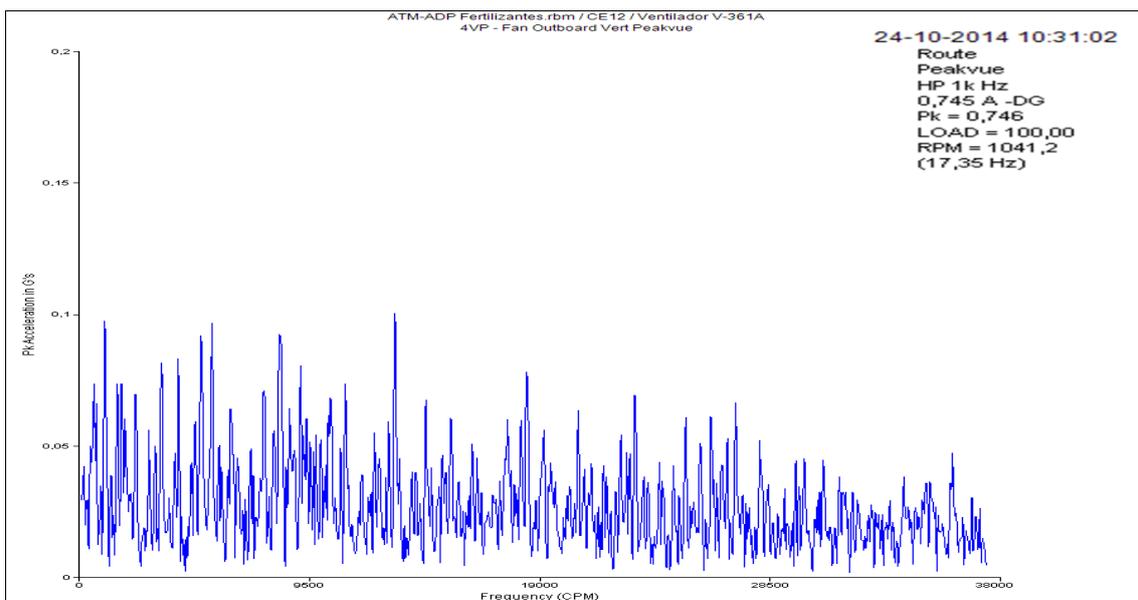


Figura 6.32 - Espectro de Frequência (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V361A.

Tabela 6.6 - Níveis sonoros de ultra-sons medidos na 2.^a campanha – V361A.

| Ponto de medição | Data da avaliação | 23-10-2014 |
|------------------|---------------------|------------|
| P3 | Memória de gravação | 58 |
| | Nível sonoro | 55 dB |
| | Frequência | 30 kHz |
| P4 | Memória de gravação | 59 |
| | Nível sonoro | 52 dB |
| | Frequência | 30 kHz |

Analisando o espectro de vibrações do ponto P3 verifica-se que o rolamento apresenta defeito na pista do anel externo. A amplitude na BPF0 e harmônicas indicam que o defeito ainda é muito incipiente (amplitude $P_k=0.125$ G's a 6477.6 rpm). O ponto P4 não apresenta frequências de defeito.

O nível sonoro medido aumentou para os 55 dB para o ponto P3 e diminuiu para os 52 dB para o ponto P4.

6.3.3.3 Comparação dos resultados das duas campanhas V361A

As Figuras 6.33 e 6.34 apresentam a comparação entre os espectros da 1.^a e 2.^a campanha (a verde e a azul respectivamente). Na Figura 6.35 são de igual forma apresentados os níveis sonoros de ultra-sons medidos antes e depois.

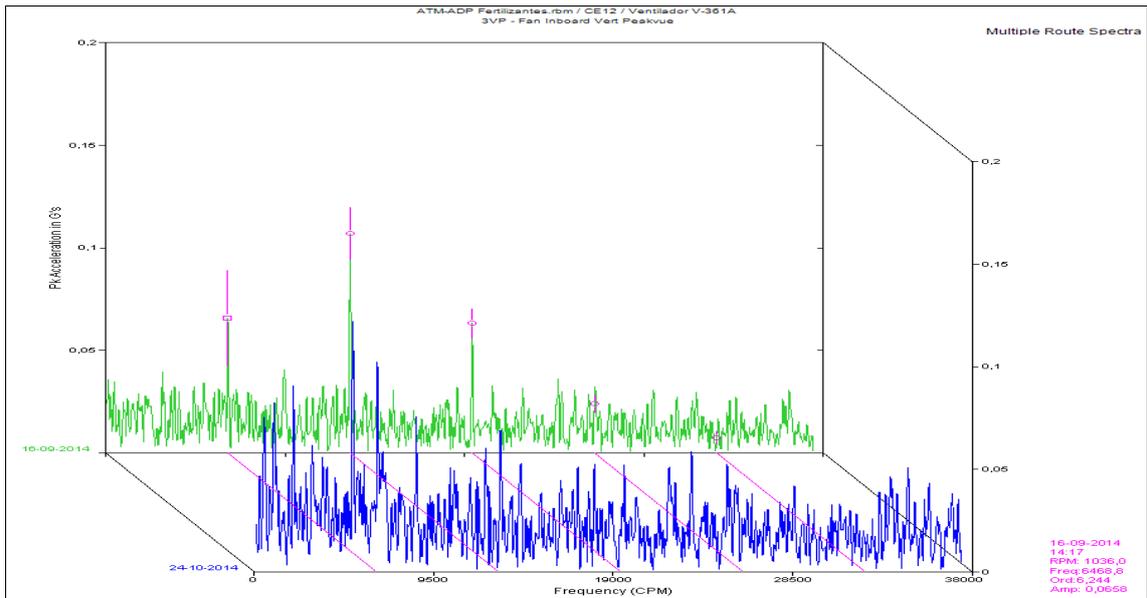


Figura 6.33 - Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P3 vertical inboard – V361A.

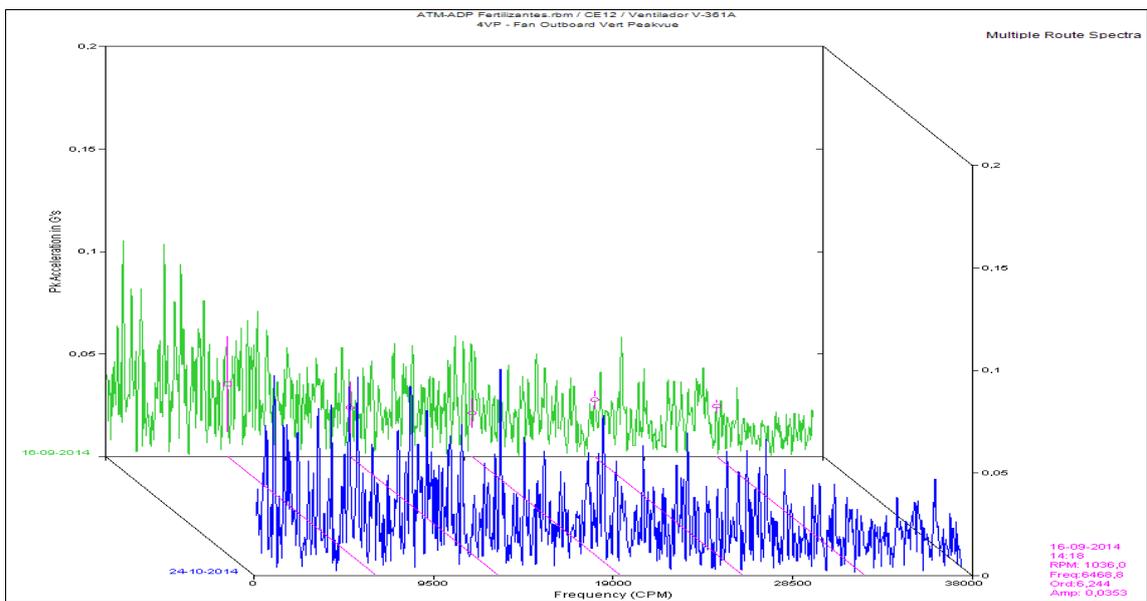


Figura 6.34 - Comparação dos espectros de frequência das duas campanhas realizadas, em (PeakVue) para o Ponto P4 vertical outboard – V361A

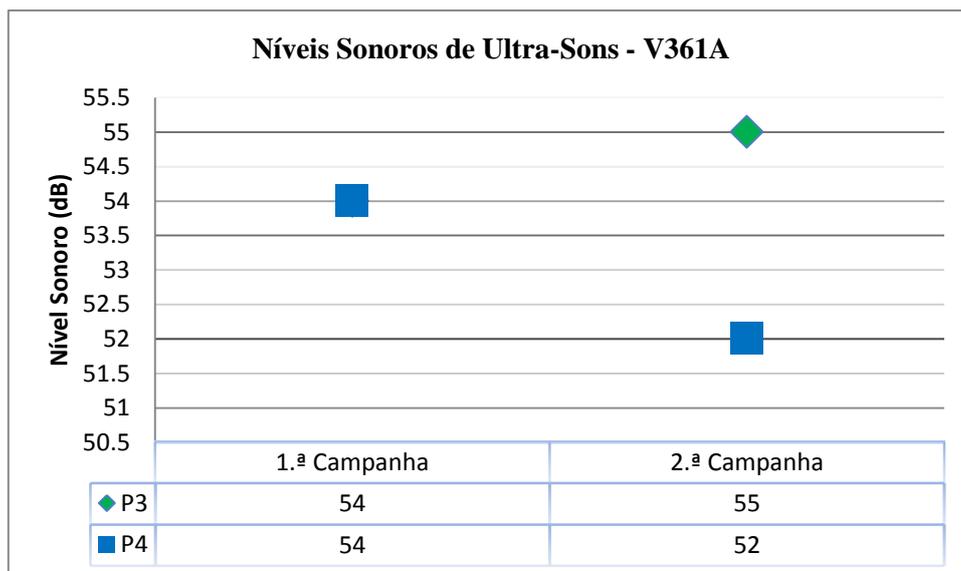


Figura 6.35 - Comparação dos níveis sonoros de ultra-sons medidos nas duas campanhas – V361A.

6.3.3.4 Análise dos resultados das campanhas efectuadas V361A

Ao contrário dos restantes equipamentos avaliados anteriormente, o ventilador V361A não sofreu qualquer tipo de intervenção entre a primeira e a segunda campanha. Nem mesmo ao nível de lubrificação.

Da análise efectuada para as vibrações, conclui-se que para o ponto P3 não houve diferenças significativas. A presença de defeito na pista externa mantém-se, e os valores de amplitude estão praticamente inalterados. O ponto P4 não apresenta frequências de defeitos em ambas as campanhas e os valores de amplitude mantêm-se baixos.

Os níveis sonoros de ultra-sons aumentaram em 1 dB para ponto P3, e diminuíram 2 dB para o ponto P4.

6.4 Caso de Estudo 2 - Modelo didáctico com simulação de defeitos em rolamentos

Como já foi referido na secção 6.1, esta parte do trabalho experimental consistiu em realizar uma série de medições de vibrações e de ultra-sons em modelo didáctico com simulação de defeitos de rolamentos, permitindo desta forma, e sabendo à priori os defeitos que deverão figurar no sinal recolhido, ser possível conseguir relacionar a técnica de análise de vibrações com os ultra-sons.

Os ensaios de detecção de defeitos em rolamentos foram efectuados no modelo didáctico da Figura 6.36, onde também se pode visualizar de forma geral a bancada de trabalho.

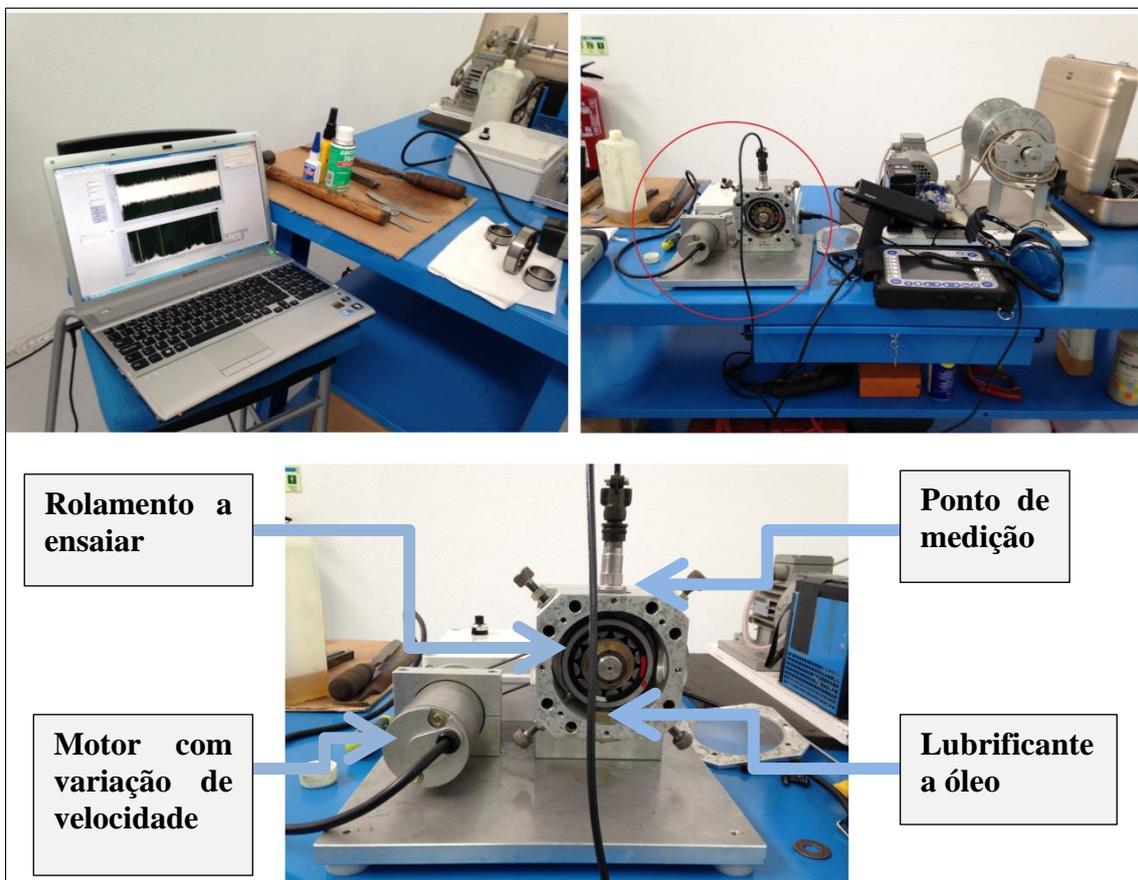


Figura 6.36 – Modelo didáctico para ensaios de rolamentos e bancada de trabalho.

O modelo didáctico permite a variação de velocidade de rotação do veio e da carga radial sobre o rolamento. A velocidade de rotação da gaiola foi medida com recurso a uma lâmpada estroboscópica como se demonstra com a Figura 6.37.



Figura 6.37 – Utilização da Lâmpada Estroboscópica.

Nos ensaios foram utilizados 3 rolamentos do mesmo modelo, cujas características gerais constam da Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Características gerais dos rolamentos ensaios

| Características gerais do rolamento SKF NU 307 ECP | |
|---|------------|
| Diâmetro da pista interna | 46,2 mm |
| Diâmetro dos rolos | 12,0 mm |
| Diâmetro da pista externa | 70,2 mm |
| Diâmetro primitivo | 58,2 mm |
| Nº de rolos | 12 |
| Ângulo de contacto | 0 ° |
| Diâmetro interno | 35 mm |
| Diâmetro externo | 80 mm |
| Capacidade de carga dinâmica | 64400 N |
| Capacidade de carga estática | 63000 N |
| Folga radial | 25 a 50 µm |
| Carga radial mínima | 338 N |
| Velocidade de referencia (óleo) | 9500 rpm |
| Velocidade de serviço máxima | 2000 rpm |
| EC - Construção melhorada | - |
| P – Gaiola de poliamida reforçada a fibra de vidro | - |

Dois defeitos singulares foram introduzidos em cada um dos rolamentos através da alteração superficial da pista interna (Figura 6.38) e do rolo (Figura 6.39). Os dados de vibração foram recolhidos e analisados através do equipamento CSI 2130 (Figura 6.40) e para o caso dos ultra-sons através do equipamento Ultraprobe 9000 (Figura 6.41). Sabendo que o equipamento usado não possui a opção de gravação do sinal, utilizou-se a aplicação desenvolvida em LabView para se fazer essa aquisição. O ruído audível nos auriculares foi então gravado em formato wav, para posterior tratamento.



Figura 6.38 - Defeito na pista interna do rolamento.



Figura 6.39 - Defeito no rolo do rolamento.



Figura 6.40 – Localização do acelerômetro para medição das vibrações com o equipamento CSI 2130.

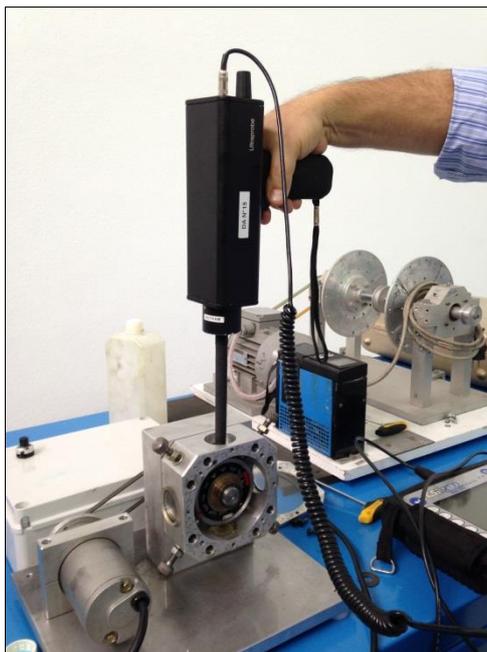


Figura 6.41 – Medição dos ultra-sons com o Ultraprobe 9000

6.4.1 Ensaios e resultados – Rolamento sem defeitos (Ensaio 1)

6.4.1.1 Ensaio 1 – Análise dos dados de Vibração

O primeiro ensaio realizado foi com um rolamento considerado “sem defeito”, e que servirá de base de comparação para os restantes dois ensaios a realizar, de forma a facilitar a correlação dos defeitos analisados com recurso às vibrações e aos de ultrasons.

A Figura 6.42 representa o espectro da envolvente do rolamento considerado como sem defeito.

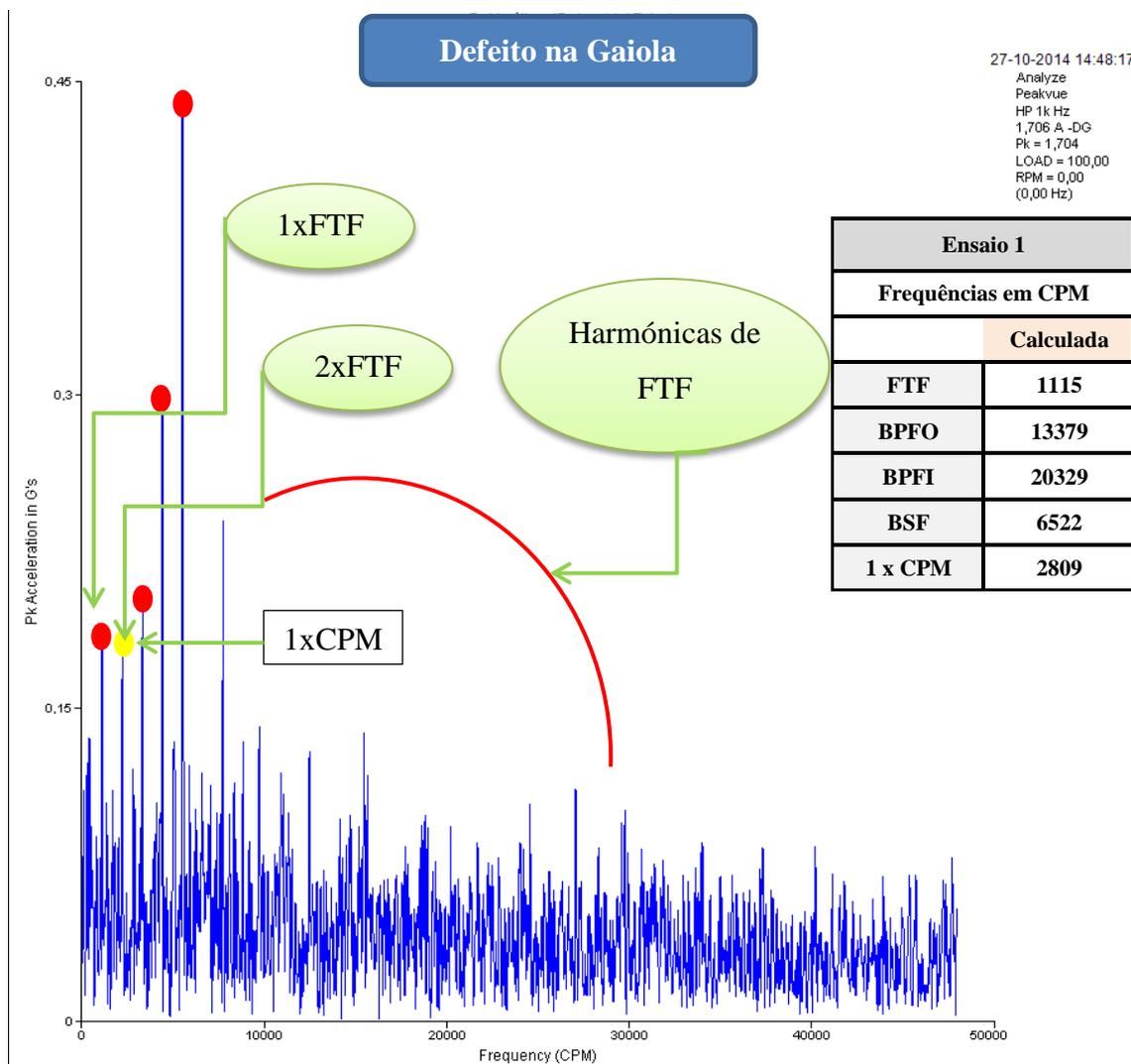


Figura 6.42 - Espectro da envolvente – Ensaio 1.

Apesar de este rolamento ter sido considerado como não contendo defeitos, o que se constata é que apresenta de forma evidente picos à frequência de defeito da gaiola (FTF). Este defeito não é muito frequente na prática, quando considerado isolado. Normalmente, a frequência deste defeito aparece associada a outros defeitos, como sejam os que ocorrem nas pistas externa e interna ou rolos. A provar está o espectro recolhido para o defeito no rolo que se apresenta de seguida (Ensaio 3). No entanto, quando este defeito ocorre isolado ele resulta normalmente da destruição por desgaste ou rotura do material constituinte da gaiola. Este mecanismo de destruição da gaiola manifesta-se pelo desequilíbrio do conjunto rotativo, isto é, conjunto constituído pela gaiola e pelos rolos ou esferas. Neste estudo apesar de este rolamento já apresentar alguns defeitos, era o que estava em melhores condições para o objectivo do ensaio.

O sinal no tempo apresentado na Figura 6.43 evidencia ainda que de forma muito suave os impactos que ocorrem na zona de carga do rolamento.

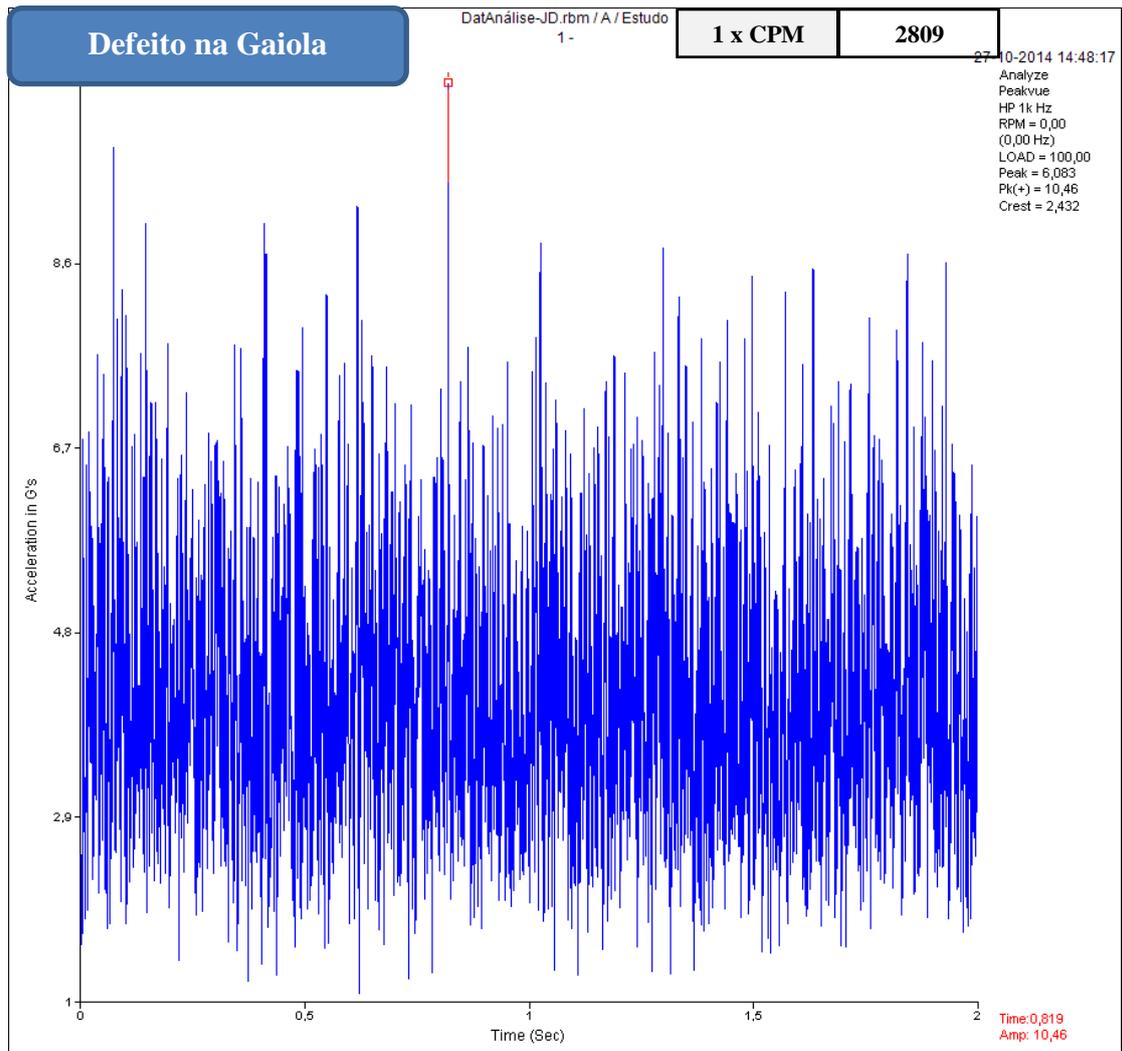


Figura 6.43 - Sinal no tempo em g's – Ensaio 1.

6.4.1.2 Ensaio 1 – Análise dos dados de ultra-sons

Os valores dos níveis sonoros de ultra-sons obtidos para o rolamento sem defeitos são os apresentados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Níveis sonoros dos ultra-sons – Ensaio 1.

| | | |
|-----------------|---------------------|--------------|
| Ensaio 1 | Memória de gravação | 100 |
| | Nível sonoro | 58 dB |
| | Frequência | 30 kHz |

A Figura 6.44 representa o espectro do sinal no tempo dos ultra-sons tratados em LabView. De igual forma que na análise das vibrações, é possível identificar as frequências de defeito na gaiola e suas harmónicas.

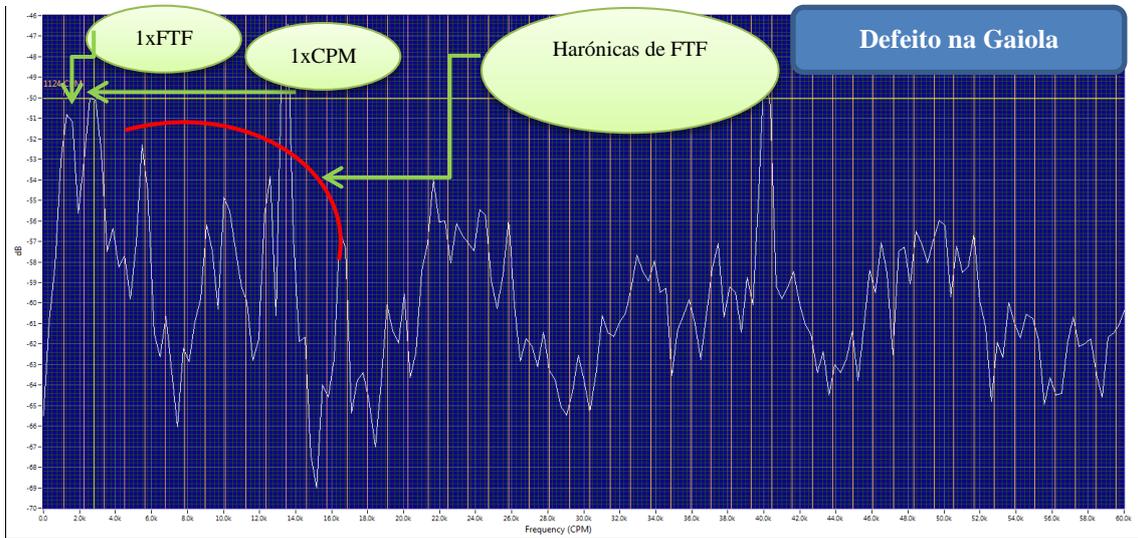


Figura 6.44 – Espectro do sinal de ruído dos ultra-sons – Ensaio 1.

O sinal no tempo apresentado na Figura 6.45 evidencia ainda que de forma muito suave os impactos que ocorrem na zona de carga do rolamento.

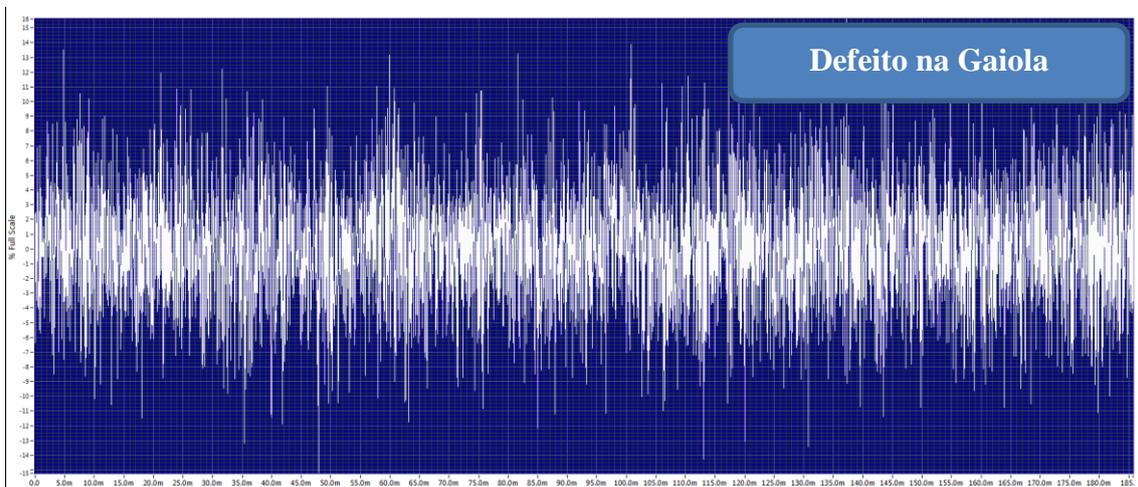


Figura 6.45 - Sinal no tempo do ruído dos ultra-sons – Ensaio 1.

6.4.2 Ensaio 2 – Rolamento com defeito da pista interna (Ensaio 2)

6.4.2.1 Ensaio 2 – Análise dos dados de Vibração

A Figura 6.46 representa o espectro da envolvente onde são visíveis as frequências de defeito da pista interna e suas harmônicas, bem como as bandas laterais à frequência de rotação da pista interna, resultantes da passagem do defeito pela zona de carga do rolamento. Note-se que neste caso a distância entre bandas laterais corresponde à frequência de rotação do equipamento.

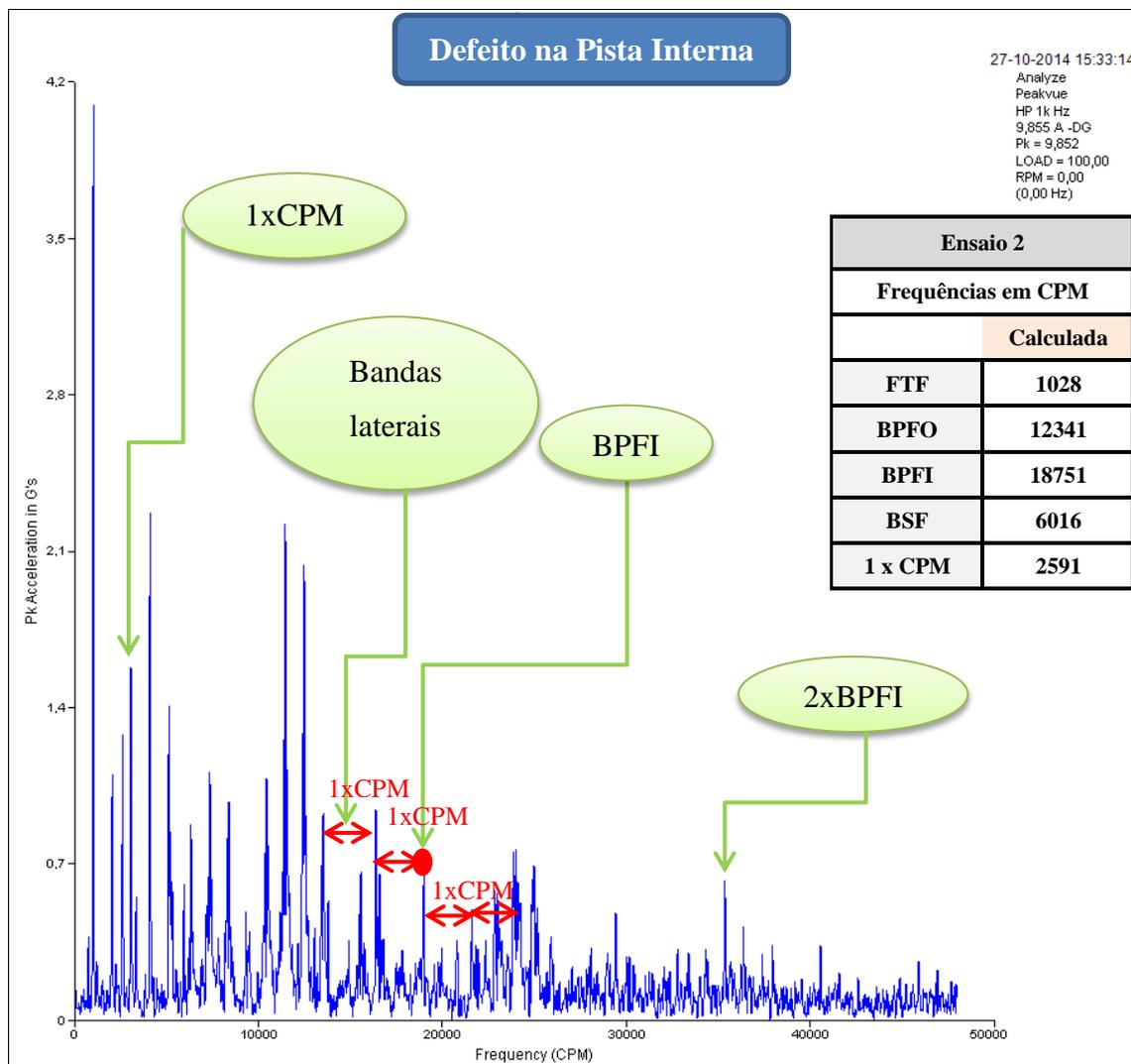


Figura 6.46 - Espectro da envolvente – Ensaio 2.

O sinal no tempo que se apresenta na Figura 6.47 evidencia os impactos que ocorrem na zona de carga do rolamento. O período entre impactos maiores ocorre após uma rotação da pista interna, correspondendo a 1xCPM.

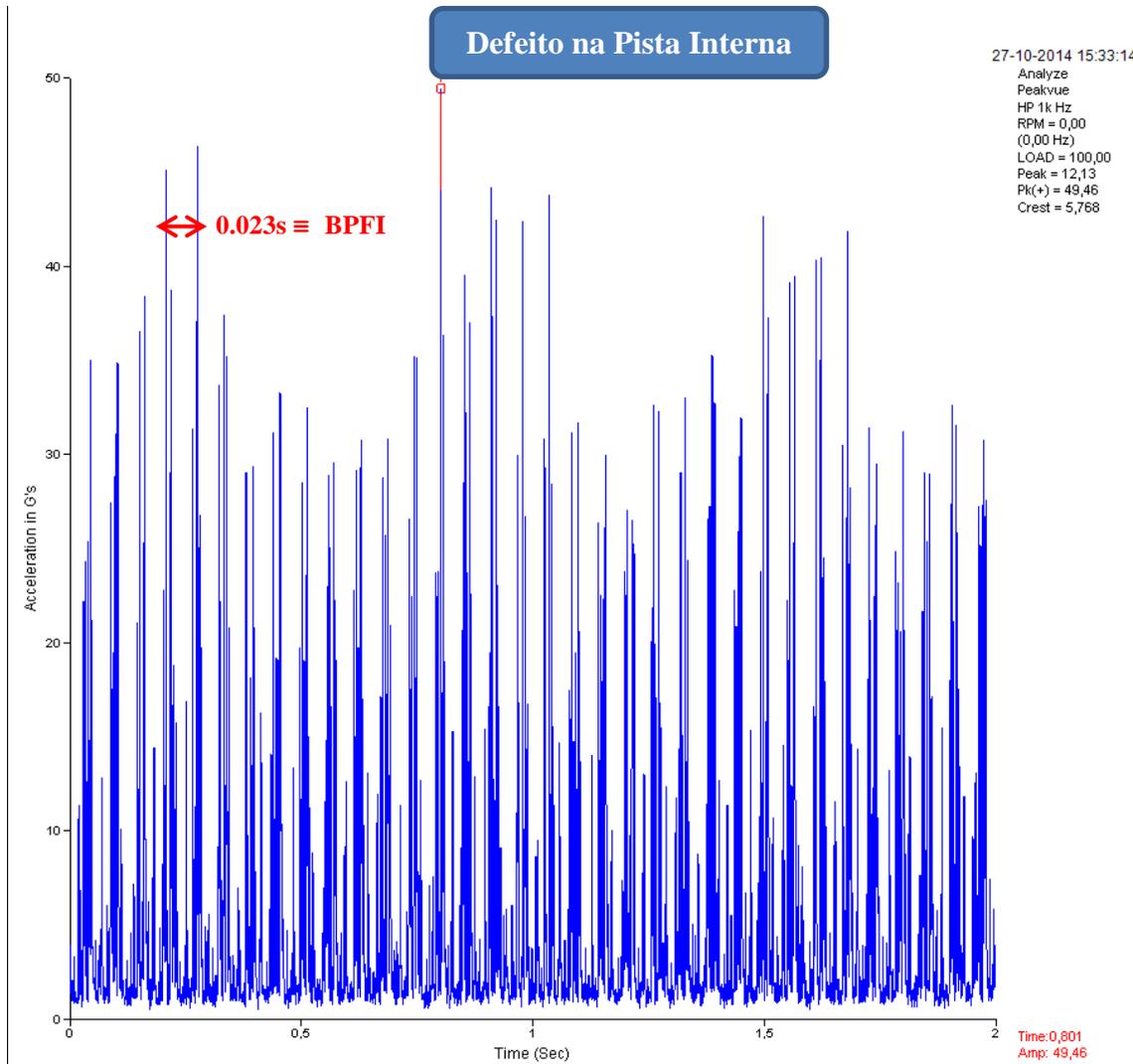


Figura 6.47 - Sinal no tempo em g's – Ensaio 2.

6.4.2.2 Ensaio 2 – Análise dos dados de ultra-sons

O valor global do nível de ultra-sons obtido para o rolamento com defeito na pista interna é apresentado na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Níveis sonoros dos ultra-sons – Ensaio 2.

| | | |
|-----------------|---------------------|--------------|
| Ensaio 2 | Memória de gravação | 101 |
| | Nível sonoro | 62 dB |
| | Frequência | 30 kHz |

A Figura 6.48 representa o espectro do sinal de ruído dos ultra-sons tratados em LabView. De igual forma que na análise das vibrações, é possível identificar as frequências de defeito da pista interna e suas harmônicas e bandas laterais à frequência de rotação da pista interna.

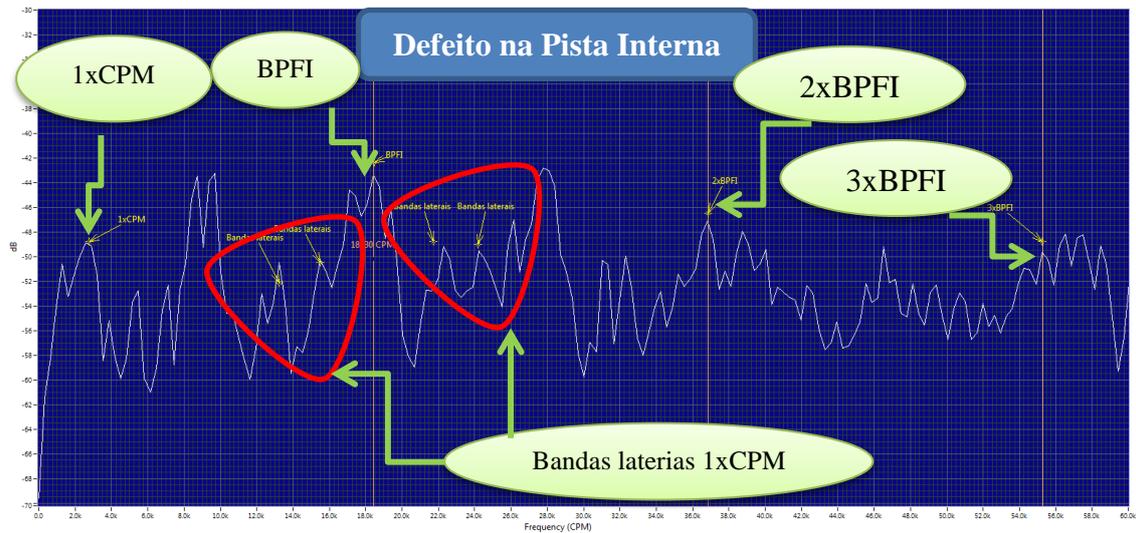


Figura 6.48 – Espectro do sinal de ruído dos ultra-sons – Ensaio 2.

O sinal no tempo apresentado na Figura 6.49 evidencia os impactos que ocorrem na zona de carga do rolamento.

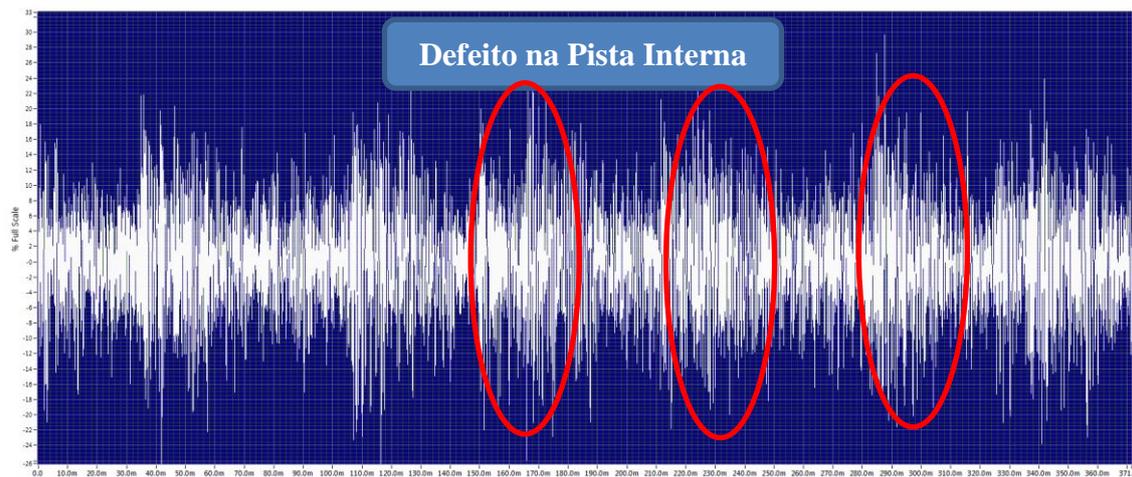


Figura 6.49 - Sinal no tempo do ruído dos ultra-sons – Ensaio 2.

6.4.3 Ensaio e resultados – Rolamento com defeito no rolo (Ensaio 3)

6.4.3.1 Ensaio 3 – Análise dos dados de Vibração

A Figura 6.50 está relacionada com o ensaio 3, onde se usou o rolamento com defeito num dos rolos. Nesta pode-se observar a frequência BSF e suas harmónicas com bandas laterais à frequência de rotação da gaiola. As bandas laterais observadas devem-se à passagem do rolo com defeito pela zona de carga à velocidade de rotação da gaiola.

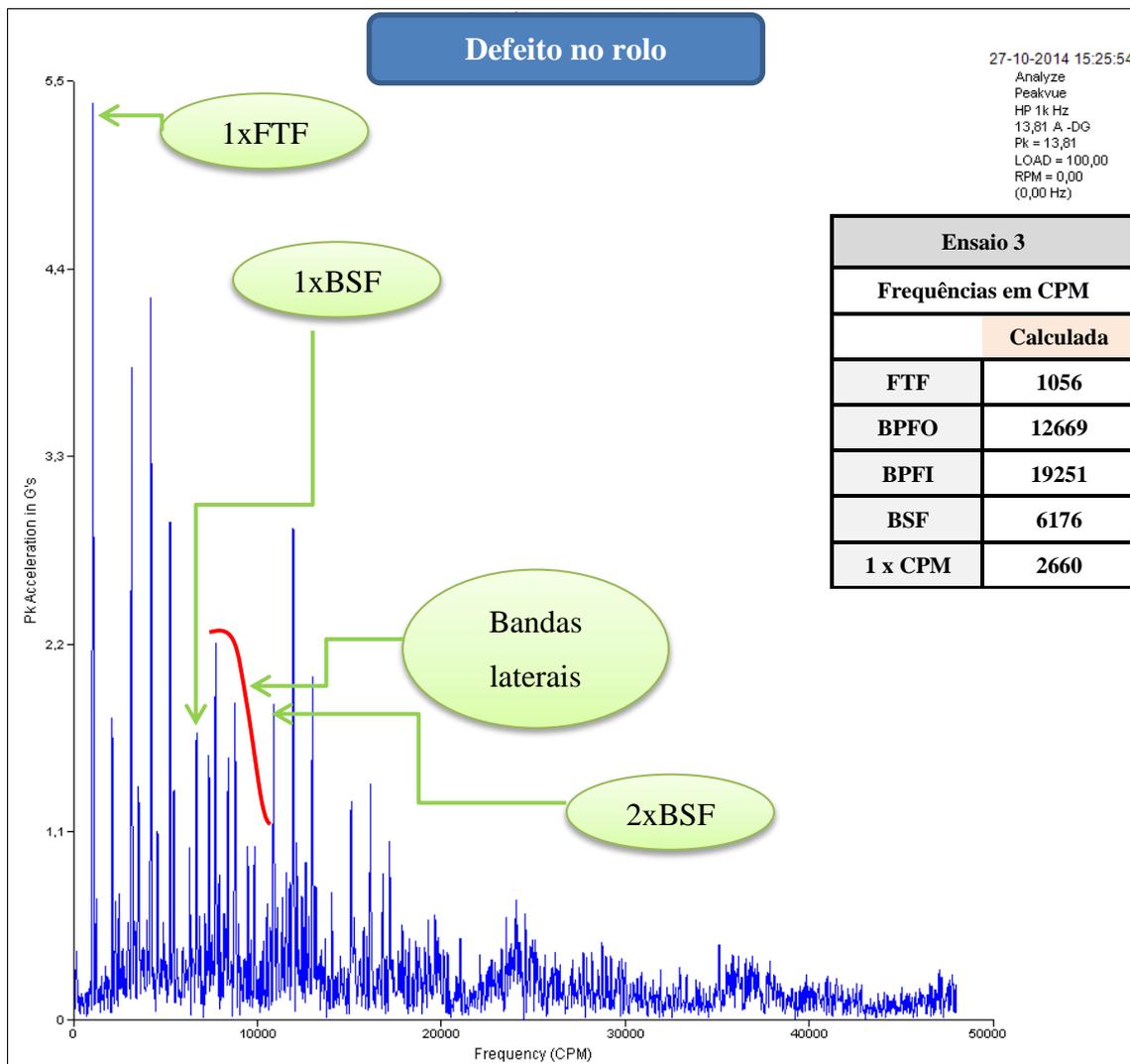


Figura 6.50 - Espectro da envolvente – Ensaio 3.

O sinal no tempo que se apresenta na Figura 6.51 evidencia os impactos que ocorrem na zona de carga do rolamento.

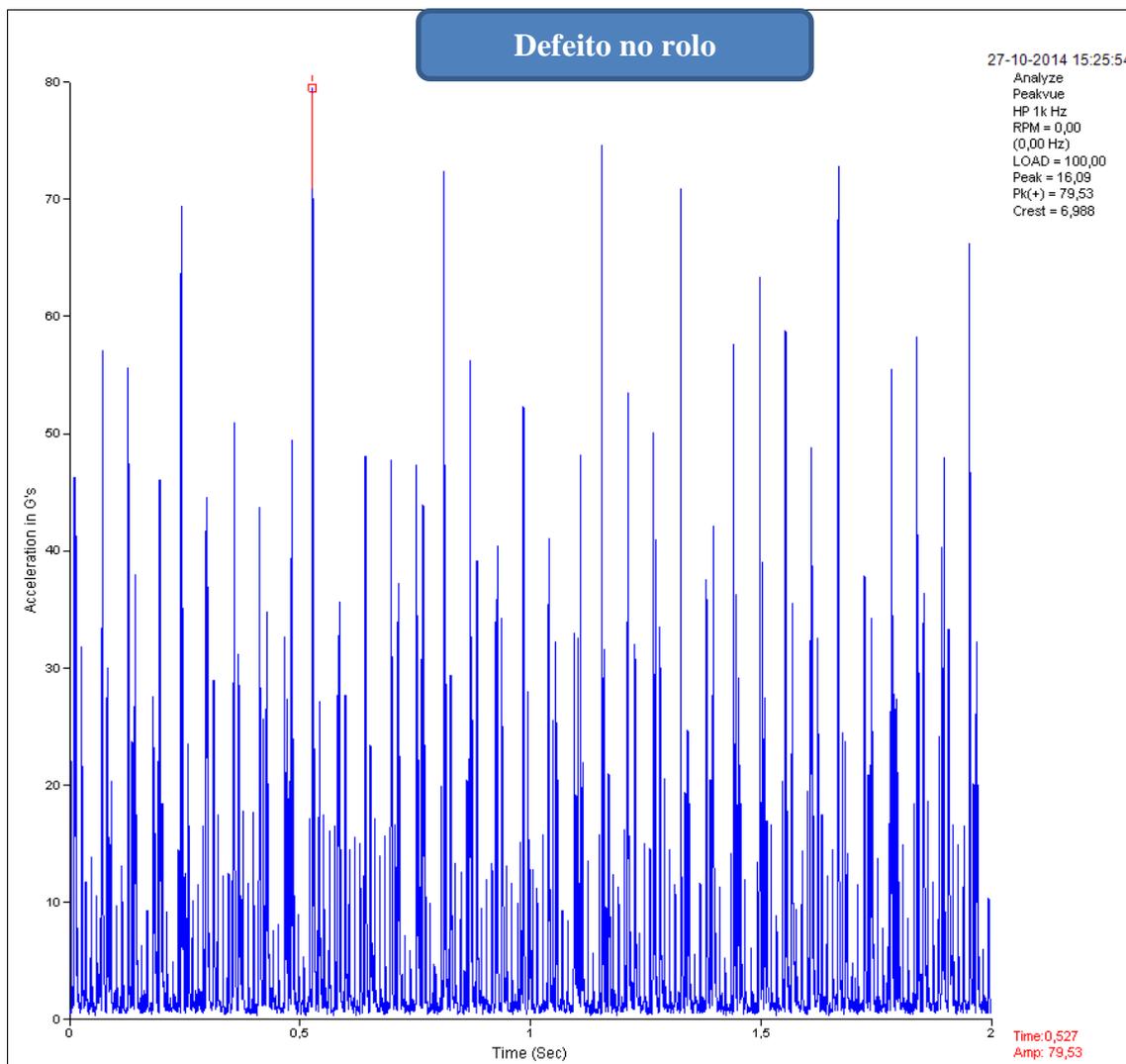


Figura 6.51 - Sinal no tempo em g's – Ensaio 3.

6.4.3.2 Ensaio 3 – Análise dos dados de ultra-sons

Os valores dos níveis sonoros de ultra-sons obtidos para o rolamento com defeito no rolo são os apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Níveis sonoros dos ultra-sons – Ensaio 3.

| | | |
|-----------------|---------------------|--------------|
| Ensaio 3 | Memória de gravação | 102 |
| | Nível sonoro | 59 dB |
| | Frequência | 30 kHz |

A Figura 6.52 apresenta o espectro do sinal dos ultra-sons tratados em LabView. De igual forma que na análise das vibrações, é possível identificar as frequências de defeito do rolo e suas harmônicas e bandas laterais à frequência de rotação da gaiola.

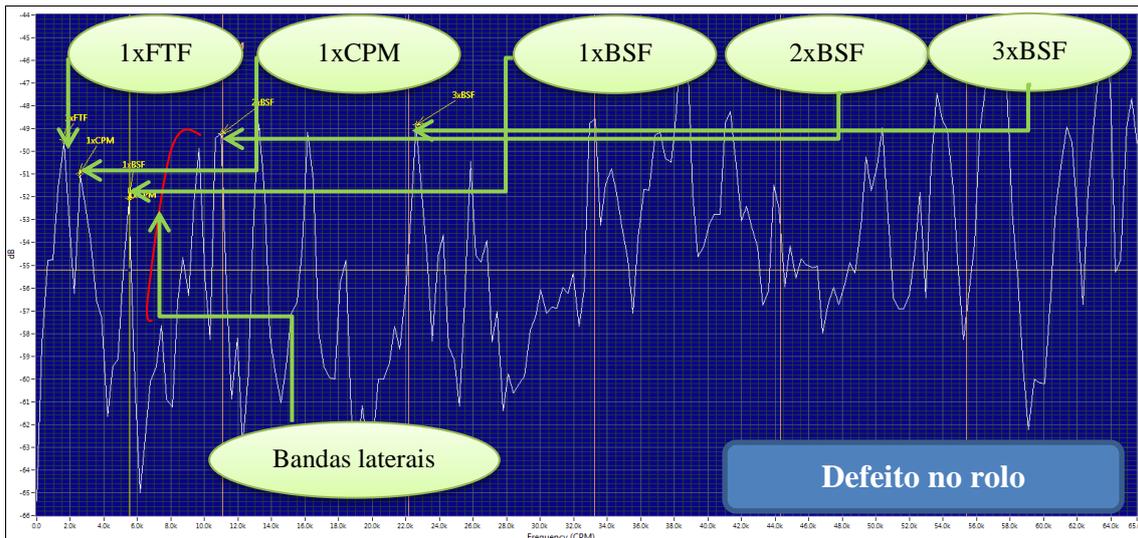


Figura 6.52 - Espectro do sinal de ruído dos ultra-sons – Ensaio 3.

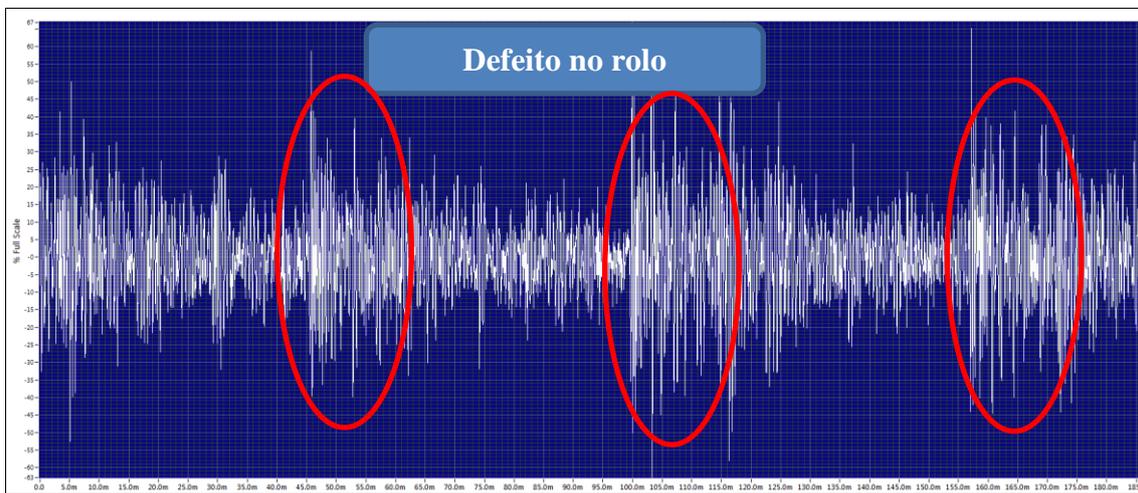


Figura 6.53 - Sinal no tempo do ruído dos ultra-sons – Ensaio 3.

7. CONCLUSÕES

A actual situação económica que o mundo atravessa, mostra por si só, as grandes exigências com que as organizações se deparam para sobreviver no mercado vigente. Os actuais padrões de concorrência levam a que sejam necessárias alterações a nível interno nas organizações, que permitam melhorias contínuas nos serviços, por forma a estabelecer elevados padrões de qualidade e alcançar o imperativo que é a satisfação do cliente.

Perante este cenário, depreende-se a importância que a área da manutenção assume dentro dessas organizações, bem como o crescente interesse pela manutenção condicionada no sentido de minimizar os desvios nos objectivos previstos, motivados por avarias em equipamentos que resultam em paragens não programadas.

A necessidade de conhecer o real estado de condição dos equipamentos levou ao desenvolvimento de técnicas, que envolvem um conjunto de hardware, muitas vezes de elevada complexidade, e das quais se podem realçar, a termografia, ultra-sons e análise de vibrações. Também os softwares, para controlo de condição são cada vez mais comuns, mais sofisticados e com maior usabilidade e uma evidencia disto, são os softwares desenvolvidos recentemente para o tratamento do sinal.

O acelerado desenvolvimento das áreas tecnológicas, obriga a um alerta contínuo por parte das organizações que pretendam fazer parte do mercado actual, para que possam tirar o máximo partido desses progressos, nomeadamente na área da detecção de avarias.

A implementação de um programa de controlo da condição requer um estudo prévio, para a definição dos equipamentos a controlar (escolha baseada na sua importância e no impacto da sua avaria na fiabilidade do sistema global), bem como a frequência com esse controlo é efectuado, no sentido de garantir que serão conseguidos resultados fiáveis e úteis para a organização.

Uma questão importante a levar em consideração aquando da definição dos locais de medição, é o conhecimento do histórico dos equipamentos que serão monitorizados. É fundamental conhecer as avarias mais frequentes tal como o seu impacto, para que a estipulação dos limites aceitáveis para esse equipamento seja feita de forma mais

realista, e seja possível direccionar as medições para pontos o mais próximo possível dos elementos susceptíveis de sofrer avarias. No estudo aqui apresentado é perceptível a importância destas considerações, visto que, os ultra-sons e as vibrações não se fazem sentir da mesma forma, em todos os pontos do equipamento e os limites impostos são determinantes na obtenção de resultados credíveis.

Os equipamentos de ultra-sons possibilitam escutar ondas sonoras que estão acima da capacidade auditiva e a sua análise, no domínio do tempo e frequência aumenta a capacidade de diagnosticar as possíveis avarias. Os ultra-sons propagados no ar e estruturas permitem também de forma imediata mediante a qualidade do som audível e do nível global tirar conclusões acerca do estado de condição de determinada máquina/equipamento, enquanto a usual análise de vibrações requer a análise posterior dos dados em escritório.

Analisando as técnicas usadas em Portugal no âmbito do controlo de condição de equipamentos/máquinas, facilmente se chega à conclusão que a análise de vibrações é a técnica mais amplamente divulgada e aplicada. No campo dos ultra-sons propagados no ar e estruturas, só recentemente, é que se verifica com algum relevo a sua aplicação em Portugal. Este facto está relacionado com dois factores: o primeiro tem a ver com o tempo que a técnica demorou para amadurecer e dar provas válidas da sua aplicação. O segundo facto, deve-se à aplicação de sistemas de certificação energéticos por parte das empresas industriais, em que os ultra-sons se tornam fundamentais para a realização de auditorias energéticas.

O trabalho desenvolvido centrou-se na exploração da aplicabilidade dos ultra-sons ao nível da inspecção de rolamentos, e comparar os resultados obtidos com os das vibrações. Considerando a experiência obtida com os levantamentos efectuados e cruzando essa informação com as conclusões obtidas, permitem que se tirem algumas vantagens e desvantagens da utilização dos ultra-sons.

Vantagens:

- É uma técnica rápida de realizar no terreno permitindo realizar muitos levantamentos em pouco tempo;
- Permite no momento da medição(através da qualidade do som ouvido) saber o estado de um determinado rolamento;

- Os níveis sonoros apresentados no display do equipamento também permitem tirar conclusões acerca do estado do rolamento (desde que se saiba os valores históricos ou muita experiência por parte do técnico);
- Outra grande vantagem que esta tecnologia apresenta, é a possibilidade de gravar o sinal para posterior tratamento e análise. Permitindo efectuar análises no domínio da frequência e de tempo. Como foi visto na secção 6.4, é possível analisar as frequências de defeito dos rolamentos através do espectro de frequências. A forma de onda no tempo também é uma fonte preciosa para análise do rolamento.
- Por último, esta técnica permite também construir a clássica curva de tendência.

Desvantagens:

- A primeira e mais importante, prende-se com o facto de que se o técnico não tiver o “ouvido treinado” torna-se difícil conseguir fazer uma análise rigorosa;
- O valor indicado no display dos níveis sonoros medidos, só permite tirar conclusões assertivas se houver o registo histórico;
- Como foi provado na realização deste estudo, os valores dos níveis sonoros medidos variam com o ajuste da sensibilidade. Esse ajuste depende do técnico, portanto, há margem para leituras erradas.

É de realçar a validade e importância que esta tecnologia “ultra-sons propagados no ar e estruturas” tem na aplicação da manutenção condicionada, não descurando utilização de outras técnicas. No entanto, esta validação é feita tendo por base os resultados obtidos da análise espectral e da forma de onda, visto que a análise dos sons audíveis e dos níveis sonoros medidos dependem em grande parte da experiência de quem realiza a monitorização.

No final do presente estudo, deve-se dizer que a relação que se procurava entre a análise dos ultra-sons e as vibrações foi verificada ao nível do ensaio experimental realizado no modelo didáctico (caso de estudo 2, apresentado na secção 6.4). Os resultados obtidos para o caso de estudo 1, apresentado na secção 6.3, como não foi possível ter-se recolhido o sinal dos ultra-sons à semelhança do que foi feito no modelo didáctico, não permitiu portanto a análise do sinal no tempo e respectivo espectro. Desta forma, e tendo por base os valores dos níveis globais sonoros medidos, permitiu concluir que estes não tem relação directa com os defeitos nem com os valores medidos em

aceleração PeakVue ou RMS. Portanto, a aplicação desta técnica com base nos níveis globais requer muita experiência e conhecimento dos valores normais para aquela máquina/equipamento. Colocando a aplicação desta técnica nestes moldes, ela é mais fiável para verificação das necessidades de lubrificação, do que para verificar o estado dos rolamentos.

Sugestões para trabalhos futuros

Uma continuação interessante para este trabalho, seria a recolha do sinal das medições de ultra-sons em uma população de máquinas/equipamentos em ambiente industrial (à semelhança do que foi feito também neste trabalho). Posteriormente efectuar a análise espectral e forma de onda no tempo e confrontar estes resultados com os de vibrações. Após esta análise, verificar se o apresentado no presente trabalho se confirma à escala real.

BIBLIOGRAFIA

- BS3811: 1984. (1984). *British Standard Glossary of Maintenance Management terms* in. British Standards Institution.
- NP EN 13306:2007. (2007). *Terminologia da manutenção*. Caparica: IPQ.
- Emerson Process Management*. (2014, 09 2). Retrieved from <http://www2.emersonprocess.com/en-US/brands/csistechnologies/pva/csi2130/Pages/CSI2130MachineryHealthAnalyzer.aspx>
- Agency, I. (2000). *Liquid penetrant and magnetic particle testing at level 2*. Austria: IAEA.
- Al-Najjar, B. (1992). On the selection of condition based maintenance for mechanical systems. In K. Holmberg, & A. Folkesson, *Operational Reliability and Systematic Maintenance* (pp. 153-173). Elsevier Science.
- Assis, R. (2004). *Apoio à decisão em gestão da manutenção: fiabilidade e manutibilidade*. Lisboa: LIDEL.
- Brandt, A. (2011). *Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Cabral, J. (2009). *Gestão da manutenção de equipamentos, instalações e edifícios*. Lisboa: LIDEL.
- Carnero, M. (2003). Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. *Decision Support Systems*, Vol. 38, pp. 539-555.
- Collacott, R. (1981, February). Who is using Condition Monitoring. *Proceedings of the 3rd National Conference on Condition Monitoring*. London.
- Concu, G., Nicolo, B., & Pani, L. (2011). Non destructive testing as a tool in reinforced concrete buildings refurbishments. *Structural Survey*, Vol. 29, pp. 147-161.

- Davies, A. (1990). *Management Guide to Condition Monitoring in Manufacture*. University of Wales: College of Cardiff.
- Dhillon, B. (2002). *Engineering maintenance: a modern approach*. Florida: CRC Press LLC.
- FLIR Systems, Inc. (2014). *FLIR - The Global Leader in the Design, Manufacture and Marketing of Thermal Imaging Infrared Cameras*. Retrieved Setembro 2014, from FLIR Instruments: <http://www.flir.com/PT/>
- Gonçalves, A., Cunha, R., & Lago, D. (2007). Vibration and wear particles analysis in a test stand. *Industrial Lubrication and Tribology, Vol.59*, pp. 209-216.
- Harris, C. (2002). *Harris' shock and vibration handbook* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Kardec, A., & Nascif, J. (2009). *Manutenção - função estratégica* (3.^a ed.). Rio de Janeiro: Qualitymark.
- Kjaer, B. (1998). Vibration measurement and analysis. *BA 7676-12*.
- Mobius Institute. (2005). *Manual do curso técnico analista de vibrações - categoria II*. Lisboa: SPECMAN.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. USA: Elsevier Science.
- Mobley, R., Higgins, L., & Wikoff, D. (2008). *Maintenance engineering handbook* (7th ed.). USA: MacGraw-Hill.
- Mullin, A. (1988, June). Manufacturing Industry - A users view. *Manufacturing Industry - A users view*. Cardiff.
- Murty, A. (1995). Availability and maintenance cost optimization of a production plant. *International Journal of Quality & Reliability Management*.
- NP 4483:2008. (n.d.). *Sistemas de gestão da manutenção*. Caparica: IPQ.

- Park, K. S., & Han, S. (2001). TPM – Total Productive Maintenance: Impact on competitiveness and a framework for successful implementation. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, 11-4*, pp. 321-338.
- Randall, R. (2011). *Vibration-based condition monitoring*. UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Roque, A. (2005). *Controlo de condição em rolamentos*. Oeiras: DatAnálise, Lda.
- Roque, A. (2006). *Sensores – Especificação, Selecção e Montagem*.
- Roque, A., Silva, T., Calado, J., & Dias, J. (2008). Rolling bearing fault detection and isolation – A didactic study. *4th WSEAS/IASME International Conference on EDUCATIONAL TECHNOLOGIES (EDUTE'08)*. Greece: ISEL.
- Sampaio, C. (2009). *Vibração mecânica na identificação de dano em máquinas*. Escola Náutica Infante D. Henrique.
- Saranga, H. (2002). Relevant condition-parameter strategy for an effective condition-based maintenance. *Journal of Quality in Maintenance, Vol. 8*, pp. 92-105.
- Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). *Practical machinery vibration analysis & predictive maintenance* (1st ed.). Oxford: ELSIVIER.
- SDT. (2014, 10). Retrieved 10 2014, from Predictive Maintenance for the masses: <http://www.sdthearmore.com/>
- Sequeira, C. (2005). *A Análise de Vibrações como Ferramenta no Diagnóstico de Avarias em Máquinas Rotativas*. Tese de Mestrado, FCT.
- Sequeira, C. (2012). *A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores*. Dissertação de Doutoramento, FCT.
- Smith, A. (1993). *Reliability - Centered Maintenance, United States of America*. USA: McGraw-Hill.
- Teknikao, I. (2012). *Medida de Vibração - Uma Ferramenta Para a Manutenção*. São Paulo.

Tsang, A. (1995). Condition-based maintenance: tools and decision making. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 1*, pp. 3-17.

UE Systems inc. (2007). *Airborne Ultrasound, Level I - Leaks, Electrical & Mechanical Inspection*. Elmsford, NY: UE Systems inc.

Uys, P., Farkas, J., Jarmai, K., & Vantonder, F. (2007). Optimisation of a steel tower for a wind. *Engineering Structures*. IRD, Entek.

ANEXOS

ANEXO I – Informação técnica do equipamento de medição Ultraprobe 9000 da UE Systems

ANEXO II – Informação técnica do equipamento de medição CSI 2130 da Emerson

ANEXO III – Informação técnica do acelerómetro usado na recolha de dados: A0760GP

**ANEXO I – Informação técnica do equipamento de medição
Ultraprobe 9000 da UE Systems**

ULTRAPROBE® 9000

Digital Ultrasonic Inspection System with the feel of Analog...versatile and easy to operate!



The Ultraprobe® 9000 is a digital ultrasonic inspection, information, storage and retrieval system that's versatile and easy to use (most operators learn within 15 minutes!). This Ultraprobe will help move you through inspections quickly. Whether used for trouble-shooting or a pre-planned route, data is easily viewed on the display panel and stored with the push of a button.

The easy-to-read display panel offers calibrated decibel readout and a 16-segment bar graph, which instantly registers sound intensity changes and simultaneously registers peak hold as you scan.

The Ultraprobe 9000 engineering combines the best of both worlds:

- Scans as quickly as with analog instruments
- Uses the digital information to store and trend

On board data logging utilizing **Ultratrend DMS™ (Data Management System)** provides:

- Multiple data views
- History table/spread sheets
- Trend charts
- Export files to MS Excel
- Flexibility as never before!



UE Systems' unique Spin and Click™ technology makes sophisticated inspection simple and quick!

You'll be amazed at how much you can accomplish with only 2 controls. By just "spinning" and "clicking" you can:

- Locate and identify potential problems
- Store data
- Change frequency and sensitivity quickly
- Download data via USB output
- Adjust basic operation modes
- Select "snap shot" function...and more!



ue
SYSTEMS INC
The ultrasound approach

Scale is in calibrated decibels traceable to NIST



ANEXO II – Informação técnica do equipamento de medição CSI 2130 da Emerson

Data Sheet de Produto
V-2130-103107
Outubro de 2007

Machinery Health™ Management

Analizador Machinery Health CSI 2130

- *Coleta de dados, análise de vibrações avançadas, alinhamento e balanceamento em um só instrumento*
- *A inteligência integrada com poderosas soluções tecnológicas para diagnóstico*
- *Compacto e robusto, para qualquer ambiente*
- *A operação intuitiva permite aprendizagem e aplicação mais rápidas.*
- *Plataforma modular, permite acrescentar aplicativos conforme as necessidades.*
- *Interface dos dados com AMS™ Suite para uma visão total da condição dos equipamentos*



A função Rota do CSI 2130 usa configurações pré-definidas possibilitando um retorno imediato sobre a condição do equipamento em, por exemplo, um gráfico de barras colorido de fácil leitura.

Visão Geral

Atualmente é exigido dos departamentos de manutenção trabalhos com menos pessoal e com orçamento bastante reduzido. Neste ambiente econômico, não é possível despendar muito tempo em busca de problemas, correndo assim, um alto risco de se ter uma parada indesejada. É preciso detectar o quanto antes e com precisão os defeitos em desenvolvimento e sua causa para que as providências necessárias sejam tomadas o mais rápido possível.

Uma solução tecnológica eficaz deve ser de fácil operação — reduzindo as necessidades de treinamento — possibilitando rápido fornecimento de informações, para que o usuário priorize suas das atividades de manutenção. O Analizador Machinery Health CSI 2130 da Emerson foi desenvolvido com essas necessidades em mente.

ANEXO III – Informação técnica do acelerómetro usado na recolha de dados: A0760GP

Specifications Sheet

March 2014

A0760GP

Industrial Accelerometer

Dynamic Performance

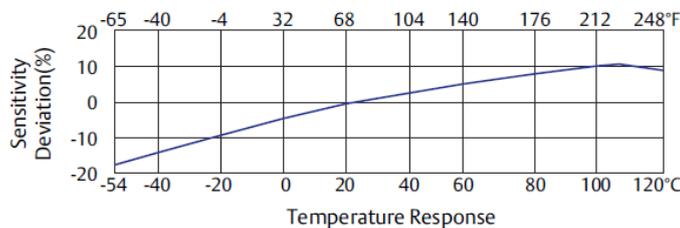
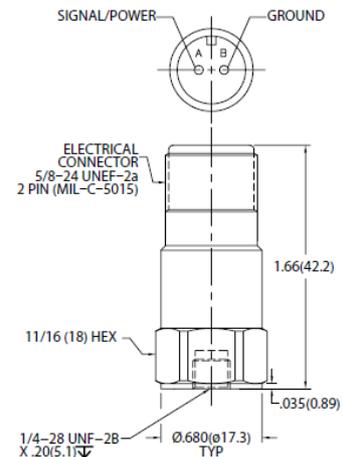
| | |
|-------------------------------|---|
| Sensitivity ($\pm 5\%$) | 100 mV/g (10.2 mV/m/s ²) |
| Measurement Range | ± 50 g (± 490 m/s ²) |
| Frequency Range (± 3 dB) | 0.50 to 10,000 Hz (30 to 600,000 cpm) |
| Mounted Resonant Frequency | 25 kHz Nominal |
| Amplitude Linearity | $\pm 1\%$ (0 Based Straight Line Method) |
| Transverse Sensitivity | $\leq 7\%$ |

Environmental

| | |
|----------------------|--------------------------------------|
| Shock Limit | 5,000g pk (49,050 m/s ²) |
| Temperature Range | -54 to 121°C (-65 to 250°F) |
| Temperature Response | See Graph |
| Sealing | Welded Hermetic |

Electrical

| | |
|------------------------------------|--|
| Settling Time | ≤ 2 sec (Within 1% of Bias) |
| Discharge Time Constant | ≥ 0.3 sec |
| Excitation Voltage | 18 to 28 VDC |
| Constant Current | 2 to 20 mA |
| Output Impedance | <200 ohms |
| Output Bias | 8 to 12 VDC |
| Broadband Resolution (1 to 10 kHz) | 350 μ g (3,434 μ m/s ²) Electrical Noise |
| Case Isolation | $>10^8$ ohms |



Specifications Sheet

March 2014

A0760GP

Mechanical

| | |
|---------------------------|------------------------------|
| Weight | 51 grams (1.8 oz) |
| Mounting Thread | ¼-28 UNF-2B |
| Mounting Torque | 2 to 5 lb ft (2.7 to 6.8 Nm) |
| Sensor Element / Geometry | Ceramic / Shear |
| Case Material | Stainless Steel |
| Connector Type (Top) | MIL-C-5015, 2 Pin |

Supplied Accessories

| |
|----------------------------|
| Multiple Point Calibration |
| ¼-28 Mounting Stud |

Emerson Process Management
835 Innovation Drive
Knoxville, TN 37932
T (865) 675-2400
F (865) 218-1401

©2014, Emerson Process Management.

The contents of this publication are presented for informational purposes only, and while every effort has been made to ensure their accuracy, they are not to be construed as warranties or guarantees, express or implied, regarding the products or services described herein or their use or applicability. All sales are governed by our terms and conditions, which are available on request. We reserve the right to modify or improve the designs or specifications of our products at any time without notice.

All rights reserved. Machinery Health is a mark of one of the Emerson Process Management group of companies. The Emerson logo is a trademark and service mark of Emerson Electric Co. All other marks are the property of their respective owners.

www.assetweb.com

