



Instituto Superior de  
**Engenharia** do Porto

**Diagnóstico de Máquinas Elétricas  
Pela Análise de Vibração**

2011 / 2012

**Silvestre José da Silva Ferreira**

**1090057**

**Mestrado em Engenharia Eletrotécnica**

**Sistemas Elétricos de Energia**

Novembro de 2012

Orientador ISEP: **Dr. José Miguel Lopes Vieira dos Santos**



# 1 Agradecimentos

Antes de mais, agradeço ao Dr. José Miguel Lopes Vieira dos Santos por ter orientado da melhor forma possível o meu trabalho, estando sempre presente e recetivo às minhas exposições ou dificuldade, o desenvolvimento deste projeto só foi possível devido á sua colaboração ativa.

À Bresimar - Automação S.A. pela preciosa ajuda na captura de sinais reais para prova da veracidade do projeto, em especial ao departamento de I&D e ao Sr. Humberto.

Aos meus pais por todo o afeto, apoio e carinho transmitido ao longo da minha vida, por todo o esforço e confiança que depositaram em mim, acreditando sempre. Traçamos objetivos tendo por base toda a educação e ideologias que nos transmitem e os meus pais foram sem dúvida alguma pessoas perfeitas e responsáveis nessa transmissão a quem dedico as minhas vitórias e conquistas.

Aos engenheiros Francisco Cesário Diegues e Leonel Cruz Lazaro a quem me concederam todo o apoio e ajuda como entidade patronal, toda a bagagem de experiencia profissional que me acompanha resulta dos sábios concelhos e valiosa experiência que me foram transmitindo desde da minha entrada na FCDiegues, além de entidade patronal são verdadeiros amigos.

À minha namorada Sónia Gonçalves, que é a pessoa mais importante da minha vida, por todo o amor, apoio, força, respeito, compreensão e ajuda nos momentos mais difíceis, por me oferecer incansavelmente o seu harmonioso companheirismo e acima de tudo por ser o meu pilar nos bons e maus momentos.

Ao meu grande amigo Nelson Saraiva por me acompanhar e aconselhar desde sempre, qualquer caminho por mais longo que seja quando percorrido com um amigo fica sempre mais curso e fácil.

A todas as pessoas que não referi e que de alguma maneira me ajudaram na concretização deste projeto o meu sincero obrigado.



## 2 Resumo

O diagnóstico de máquinas elétricas pela análise de vibração é utilizado num plano de manutenção, onde é dado a conhecer a “real condição do equipamento”, e surgiu da necessidade de detetar vibrações indesejáveis nas máquinas elétricas, de uma forma simples e com custos acessíveis.

Numa fase inicial é obtido um sinal correspondente á vibração da máquina, recorrendo a um acelerómetro, que dependendo da aceleração da máquina, constrói uma forma de onda correspondente.

A forma de onda fica guardada em formato de áudio \*.wav.

Posteriormente, em *software Matlab* o ficheiro \*.wav irá ser carregado, e comparado com o ficheiro \*.wav original da máquina. Ao comparar os ficheiros o *software* analisa o espectro original da máquina através da transformada de Fourier, com o espectro atual. Se este espectro sair do intervalo de segurança, o *software* deteta nesse espectro a origem da vibração, pois cada vibração tem uma frequência associada.

Percorridos os passos descritos, o *software* disponibiliza ao utilizador as respetivas formas de onda e todo o restante diagnóstico de forma a uma possível intervenção antecipada da avaria.

**Palavras Chave:** Acelerómetro, *Matlab*, DFT, RPM, espectro, vibrações



### 3 Abstract

The electric machinery diagnostics through analysis of vibrations is using a maintenance where the main objective is “knowing the real state of the equipment”, and came out of the necessity of detecting unwanted vibrations in a simple and low costing way.

Initially a signal that matches the machine’s vibration is obtained with the use of an accelerometer. With this signal and depending on its axes a wave shape is formed.

The signal will be stored in an audio format \*.wav.

After this, the \*.wav file will be loaded and compared to the machine’s original \*.wav file by the software Matlab. With the help of the Fourier transform the software analysis the original spectrum of the machine, comparing the two files. If this new spectrum reaches out of the security boundaries the software detect the source of the vibration, because vibration has its own frequency.

After all these steps, the software gives all of the necessary wave forms and all of the diagnostics in order to prevent a possible breakdown.

**Key Words:** Accelerometer, Matlab, DFT, RPM, spectrum, vibrations.



## 4 Índice

<b>1</b>	<b>Agradecimentos</b> .....	<b>v</b>
<b>2</b>	<b>Resumo</b> .....	<b>vii</b>
<b>3</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>ix</b>
<b>4</b>	<b>Índice</b> .....	<b>xi</b>
<b>5</b>	<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>xvii</b>
<b>6</b>	<b>Índice de Tabelas</b> .....	<b>xxi</b>
<b>7</b>	<b>Notação e Glossário</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>19</b>
1.1	Enquadramento .....	19
1.2	Apresentação do Projeto .....	20
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b> .....	<b>23</b>
2.1.1	FLUKE 810 .....	23
2.1.2	Vibrometria Laser/Ótica .....	25
<b>3</b>	<b>Manutenção</b> .....	<b>29</b>
3.1	Introdução .....	29
3.2	Definição de Manutenção .....	29
3.3	Informações Históricas de Manutenção .....	30
3.4	Qual o Objetivo da Manutenção .....	31
3.4.1	Segurança .....	31
3.4.2	Qualidade .....	31
3.4.3	Custo .....	31
3.4.4	Disponibilidade .....	32
3.5	Importância da Manutenção .....	33

3.6	Metodologias de Manutenção .....	33
3.6.1	Manutenção Reativa (ou Corretiva).....	34
3.6.2	Manutenção Preventiva .....	35
3.6.3	Manutenção Preditiva .....	35
3.7	Principais Técnicas Preditivas .....	37
3.7.1	Sensitiva .....	38
3.7.2	Análise de Vibração.....	38
3.7.3	Termografia .....	38
3.7.4	Análise do Óleo .....	39
3.7.5	Objetivos da Manutenção Preditiva .....	41
3.8	Resumo das Metodologias .....	41
<b>4</b>	<b>Vibração.....</b>	<b>43</b>
4.1	Introdução .....	43
4.2	Escolha do instrumento de medição.....	44
4.2.1	Faixa de Frequências e Amplitudes .....	44
4.2.2	Tamanho da Máquina ou Estrutura.....	44
4.2.3	Condição de Operação da Máquina .....	44
4.2.4	Tipo de Análise dos Dados .....	44
4.3	Sensor.....	45
4.3.1	Sensores de Resistência Variável .....	45
4.3.2	Sensores Piezoelétricos.....	47
4.3.3	Sensores Eletrodinâmicos .....	48
4.3.4	Transformador Diferencial Linear Variável (LVDT).....	49
4.4	Sensores de Vibração .....	50
4.4.1	Vibrômetro .....	50
4.4.2	Acelerômetro .....	50
4.5	Grandezas da vibração .....	50
4.5.1	Deslocamento .....	51
4.5.2	Velocidade.....	51
4.5.3	Aceleração .....	51
4.6	Frequência de Vibração .....	51

4.6.1	Hz .....	51
4.6.2	CPM .....	51
4.6.3	ORDEM .....	51
4.7	Obtenção das Componentes Harmônicas de um Sinal Qualquer.....	51
4.7.1	Transformada de Fourier .....	52
4.7.2	Transformadas Discretas de Fourier.....	53
4.7.3	Transformada Rápida de Fourier (FFT) .....	54
4.8	Amplitude de Vibração.....	54
4.8.1	Valor Pico a Pico.....	54
4.8.2	Valor Pico.....	55
4.8.3	Valor RMS .....	55
4.8.4	Relação dos Níveis de Amplitude de Vibração .....	56
<b>5</b>	<b>Causas da Vibração Mecânica .....</b>	<b>57</b>
5.1	Desbalanceamento .....	57
5.1.1	Causas do desbalanceamento .....	58
5.2	Desalinhamento .....	58
5.2.1	Desalinhamento Angular .....	58
5.2.2	Desalinhamento Paralelo .....	59
5.2.3	Desalinhamento Combinado .....	59
5.2.4	Desalinhamento por Apoio de Rolamento.....	59
5.2.5	Desalinhamento de Correias.....	60
5.3	Excentricidade .....	61
5.4	Problemas em Apoios de Deslizamento .....	62
5.4.1	Folga Excessiva.....	62
5.4.2	Processo com Lubrificação ( <i>OIL WHIRL</i> ) .....	63
5.4.3	Precessão Histerética .....	66
5.4.4	Lubrificação Inadequada .....	66
5.5	Elementos Mecânicos Soltos .....	67
5.6	Dentes de Engrenagens.....	68
5.7	Apoio de Rolamentos Defeituosos .....	71
5.7.1	Outras Causas de Falhas em Apoios de Rolamentos.....	72

5.8	Problemas Elétricos .....	74
5.9	Vibrações Devido a Forças Aerodinâmicas e Hidráulicas.....	75
5.10	Vibrações Devido a Fricções .....	77
<b>6</b>	<b>Normas para Avaliação da Vibração de Máquinas Elétricas .....</b>	<b>81</b>
6.1	Normas Nacionais e Internacionais.....	81
6.1.1	Normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) .....	81
6.1.2	Normas IEC ( <i>International Electrotechnical Commission</i> ).....	82
6.1.3	Normas ISO ( <i>International Organization for Standardization</i> ) .....	82
6.1.4	Normas NEMA ( <i>National Electrical Manufacturers Association</i> ).....	83
6.1.5	Normas IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) .....	83
6.1.6	Normas BS ( <i>British Standard</i> ).....	83
6.1.7	Normas API ( <i>American Petroleum Institute</i> ) .....	83
6.2	Principais Normas de Medição de Vibração em Vazio .....	84
6.2.1	Campo de Aplicação e Parâmetros de Medição.....	84
6.2.2	Pontos Recomendados de Medição de Vibração .....	85
6.2.3	Apoio Elástico para Ensaio das Máquinas Elétricas .....	87
6.2.4	Fixação em Base Rígida para Ensaio das Máquinas Elétricas .....	88
6.2.5	Balanceamento.....	88
6.3	Normas que Sugerem Limites de Vibração em Serviço .....	89
6.3.1	Pontos de Medição de Vibração Segundo a Norma ISO 10816-1 .....	90
6.3.2	Condição de Fixação da Máquina Segundo a Norma ISO 10816-1 .....	90
6.3.3	Critérios de Avaliação da Vibração Segundo a Norma ISO 10816-1.....	90
6.3.4	Limites operacionais de vibração segundo a norma ISO 10816-3.....	93
<b>7</b>	<b>Opções de Projeto.....</b>	<b>95</b>
7.1	Escolha do Sensor .....	95
7.2	Caixa para o Sensor .....	98
7.3	Interface Informática Usada.....	99
7.4	Gravação do Sinal em Ficheiros *.wav.....	100
7.4.1	Placa de Som, Entrada Microfone (para aquisição de dados).....	100
7.4.2	Escolha da extensão *.wav .....	102

7.4.3	Configuração do Jack Áudio .....	103
7.5	Saturação do Sensor SDT1 .....	103
7.6	Maquina Utilizada Nas Capturas .....	106
<b>8</b>	<b>Descrição da componente estrutural.....</b>	<b>107</b>
8.1	Estrutura de Hardware (Estrutura Física) .....	107
8.2	Estrutura de Software (Programação Matlab) .....	108
<b>9</b>	<b>Conclusões e Perspectivas Futuras .....</b>	<b>109</b>
9.1	Conclusões Sobre as Simulações.....	109
9.2	Limitações .....	110
9.3	Trabalho futuro .....	110
9.3.1	Leitura nos 3 Eixos.....	110
9.3.2	Caixa de Acoplamento .....	111
9.3.3	Alimentação USB Caso Necessário .....	111
9.3.4	Formato *.wma ou *.wav .....	111
9.3.5	Melhoramento da Aplicação.....	111
9.4	Apreciação final.....	112
<b>10</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>113</b>
	<b>ANEXO I – Guia de Utilizador .....</b>	<b>115</b>
1.	Apresentação do Software.....	118
2.	Carregar Original.....	118
3.	Carregar Defeito .....	119
4.	Desbalanceamento e Problemas Elétricos .....	120
5.	Envio de Sinais para <i>SPTOOL</i> .....	121
6.	Visualizar no Tempo .....	121
7.	Botões Auxiliares .....	124
	<b>ANEXO II - Código Matlab.....</b>	<b>125</b>
1.	Programação da Aplicação em Matlab .....	127



## 5 Índice de Figuras

Figura 1 - Medidor de vibração Fluke 810. _____	23
Figura 2 - Composição do pack Fluke 810. _____	25
Figura 3 - Utilização prática do Fluke 810 (QEnergia, 2012). _____	25
Figura 4 - Ilustração de alguns dos sistemas de vibrometria, (Ometron Ltd., 2012). _____	26
Figura 5 - Sistema VPI 4000 com sensor e hardware (Ometron Ltd., 2012) _____	27
Figura 6 - Imagem produzida por leitura a laser, (Ometron Ltd., 2012) _____	28
Figura 7 - História da Manutenção, fonte (AEP, 2003). _____	30
Figura 8 - Custos diretos e custos indiretos da manutenção. _____	32
Figura 9 - Lucro versus disponibilidade (Murty, 1995) _____	32
Figura 10 - Importância da manutenção, editado de (AEP, 2003). _____	33
Figura 11- Identificação das metodologias e enquadramento do projeto. _____	34
Figura 12 - Princípio da manutenção reativa. (Teknikao, 2012) _____	34
Figura 13 - Princípio da manutenção preventiva, (Teknikao, 2012). _____	35
Figura 14 - Comportamento de Falha. _____	37
Figura 15 - Imagens obtida através de uma camera termográfica Flir i-7. _____	39
Figura 16 - Diagrama de metodologias de manutenção. _____	42
Figura 17 - Comparação da eficiência da manutenção ao longo da sua evolução. _____	42
Figura 18 - Esquema básico de medição de vibrações. _____	43
Figura 19 - Extensômetro. _____	45
Figura 20 - (a) esquema do sensor, (b) ponte Wheatstone. _____	46
Figura 21 - Acelerômetro Piezoelétrico _____	48
Figura 22 - Sensor eletrodinâmico. _____	49
Figura 23 - LVDT _____	50
Figura 24 - Aplicação em um sinal da Transformada de Fourier) (Teknikao, 2012). _____	52
Figura 25 - Passagem do sinal no tempo para um espectro de frequência. _____	53
Figura 26 - Passagem do espectro de frequência para um sinal no tempo. _____	53

Figura 27 – FFT aplicada a uma máquina (Teknikao, 2012)	54
Figura 28 - Medição da amplitude Pico a Pico (Sampaio, 2004)	55
Figura 29 - Medição de amplitude pelo valor de Pico (Sampaio, 2004)	55
Figura 30 - Medição de amplitude pelo RMS, (Sampaio, 2004)	56
Figura 31 - Relação dos níveis de amplitude de vibração (Sampaio, 2004).	56
Figura 32 - Desalinhamento angular (Piccoli, s/d).	58
Figura 33 - Desalinhamento Paralelo (Piccoli, s/d)	59
Figura 34 - Desalinhamento Combinado (Piccoli, s/d)	59
Figura 35 - Apoio de Rolamento	60
Figura 36 - Apoio de Deslizamento	60
Figura 37 - Desalinhamento de Polias	61
Figura 38 - Tipos de excentricidade. (Piccoli, s/d)	61
Figura 39 - Apoio com precessão e com lubrificação (oil whirl), (Piccoli, s/d).	63
Figura 40 - Análise de uma máquina com sintomas de oil whirl (Piccoli, s/d).	64
Figura 41- Apoios projetados para reduzir a possibilidade de whirl (Piccoli, s/d).	65
Figura 42 - Elemento Mecânico solto (Piccoli, s/d).	67
Figura 43 - Força centrífuga com elemento solto (Piccoli, s/d).	68
Figura 44 - Espectro de equipamento com problema de engrenagem (Piccoli, s/d).	69
Figura 45 - Problema de desalinhamento que gera vibrações na frequência de engrenamento (Piccoli, s/d)	70
Figura 46 - Diferença entre desbalanceamento e dente de engrenagem avariado (Piccoli, s/d)	70
Figura 47 - Máquina com apoios de rolamentos defeituosos (Piccoli, s/d).	72
Figura 48 - Falha em esfera de rolamento (Bonadiman, s/d).	73
Figura 49 - Medição de vibração causada por forças hidráulicas (Piccoli, s/d).	76
Figura 50 - Espectro de uma vibração causada por cativação (Piccoli, s/d)	77
Figura 51 - Pontos de medição de vibração segundo as normas, (WEG, 2012)	85
Figura 52 - Recomendações dos fabricantes quanto à localização do sensor de vibração (WEG, 2012).	86
Figura 53 -Pontos de medição de vibração verticais segundo a IEC 60034-14	87
Figura 54 - Deformação da mola e da base elástica sob ação do peso próprio da máquina.	87
Figura 55 - Representação gráfica das zonas de avaliação de vibração da norma ISO 10816-1.	91
Figura 56 – Acelerómetro de 3 eixos tipicamente utilizado na robótica industrial.	96

Figura 57 – Acelerómetro industrial 8032-01 da Measurement Specialities. _____	96
Figura 58 – Curva de resposta do sensor SDT1 (MEAS, 2012). _____	97
Figura 59 - Sensor utilizado inicialmente, modelo SDT1 da Measurement Specialities. _____	98
Figura 60 - Desenho de preparação elaborado em AUTOCAD. _____	98
Figura 61 - Caixa de Encapsulamento Construída _____	99
Figura 62 - Caixa com sensor acoplados á maquina de estudo. _____	99
Figura 63 - Princípio da conversão analógico-digital da placa de som. _____	100
Figura 64 - Esquema das Entradas e Saídas de uma Placa de Som (Murasugi, 2003). _____	101
Figura 65 - Configuração do Jack audio 3.5 em mono. _____	103
Figura 66 – Sinal real obtido com sensor SDT1-028K. _____	104
Figura 67 - Visualização do espectro Dados_Origem.wav na aplicação. _____	105
Figura 68 - Visualização espectro Dados_Origem.wav versus espectro Prob_Desbalanceamento.wav na aplicação. _____	105
Figura 69 – Visualização espectro Dados_Origem.wav versus espectro Prob_Elétricos.wav na aplicação. _____	106
Figura 70 - Componente estrutural - Hardware _____	107
Figura 71 - Estrutura de Software. _____	108
Figura 72 - Verificação dos resultados na simulação do defeito de desbalanceamento. _____	109
Figura 73 - Verificação dos resultados na simulação do defeito problemas elétricos. _____	110
Figura 74 – Acelerómetro triaxial 8102A da MEAS – Mesurement Specialities. _____	110
Figura 75 - Janela da Aplicação "Diagnóstico Máquinas Elétricas Pela Análise de Vibração" _____	118
Figura 76 - Ficheiro original carregado e sua apresentação. _____	119
Figura 77 - Ficheiro com defeito carregado e sua apresentação. _____	119
Figura 78 - Defeito de problemas elétricos após pressionar o botão PROB. ELÉTRICOS. _____	120
Figura 79 - Defeito de desbalanceamento após pressionar o botão DESBALANCEAMENTO. _____	120
Figura 80 - Envio de dados para "SPTOOL". _____	121
Figura 81- Modo visualizar sinal tempo e criar sinal espectral. _____	122
Figura 82 - Sinal obtido em função do tempo no ficheiro defeito. _____	122
Figura 83 - Modo visualizar sinal tempo e criar sinal espectral. _____	123
Figura 84 - Sinal original transformado em sinal de frequência usando FFT. _____	123
Figura 85 - Dois sinais em simultâneo no "SPTOOL". _____	124



## 6 Índice de Tabelas

Tabela 1 - Notação e Glossário _____	xxiii
Tabela 2 - Transformadas Discretas de Fourier _____	53
Tabela 3 - Causas comuns de falhas em rolamentos (Piccoli, s/d). _____	73
Tabela 4 – Resumo das causas de vibração e respectivas características. _____	79
Tabela 5 – Campo de aplicação de alguns parâmetros das principais normas. _____	85
Tabela 6 - Requisitos a serem satisfeitos pela base rígida. (WEG, 2012). _____	88
Tabela 7 - Resumo do campo de aplicação e os parâmetros de medição das principais normas que estabelecem critérios de medição de vibração de máquinas elétricas rotativas na condição operacional (WEG, 2012). ____	89
Tabela 8- Zonas de avaliação da severidade de vibração segundo a norma ISO 10816-1. _____	91
Tabela 9 - Valores de severidade de vibração sugeridos na norma ISO 10816-1. _____	92
Tabela 10 - Características da máquina em estudo. _____	106



## 7 Notação e Glossário

FFT	Fast Fourier Transform
ISO	International Organization for Standardization
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEC	International Electrotechnical Commission
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
BS	British Standard
API	American Petroleum Institute
RMS	Root Mean Square
RPM	Rotação por Minuto
Db	Decibéis
Hz	Frequência em ciclos por segundo ou hertz
WAV	Formato de áudio padrão
WMA	Formato de áudio recente

*Tabela 1 - Notação e Glossário*



# 1 Introdução

Para fazer face a mercados globalizados e conseqüente aumento de concorrência, as empresas viram-se confrontadas com a necessidade de evoluir para poderem sobreviver. Esta evolução passará pela melhoria de qualidade nos seus produtos e serviços, bem como pela redução de custos, de modo a responder a um mercado cada vez mais exigente economicamente e em constante mudança. A sobrevivência das empresas ou organizações depende da habilidade de competir efetivamente.

## 1.1 Enquadramento

Uma das áreas que se revela crucial na obtenção destes objetivos é a manutenção industrial, não só pela crescente necessidade de maquinaria na indústria, como pela redução de custos e aumento de fiabilidade que oferece às suas linhas de produção. Por vezes são linhas muito extensas, onde é necessário diagnosticar o estado de deterioração dos seus componentes e maquinaria, assim como o estado dos sistemas que lhe estão acoplados, para que, prevendo a evolução do seu estado, se possam agendar operações de manutenção, prevenindo e atuando na substituição ou reparação antes da ocorrência de alguma anomalia ou avaria, evitando custos descontrolados e mais elevados provenientes da substituição de elementos ou paragem da produção, podendo ter até, que suportar custos de substituição de elementos que se danificaram com a não atuação sobre o elemento danificado.

Com a realização do *Diagnóstico de Máquinas Elétricas pela Análise de Vibração* procurou-se desenvolver uma ferramenta de maior valia nas operações complexas de manutenção e diagnóstico de máquinas elétricas que fazem uso da técnica preditiva da medição dos níveis da vibração, onde o objetivo é igualar funções disponíveis por outros projetos de êxito e afirmados no mercado, mas com um custo de aquisição muito maior que o necessário para a aquisição deste projeto.

## 1.2 Apresentação do Projeto

Todo o corpo em movimento origina a si um determinado nível de vibração e as máquinas elétricas quando em funcionamento não são exceção, e têm sempre associado um determinado nível de vibração padrão e que pode ser assumido como a sua *assinatura espectral*.

Entenda-se por assinatura espectral a forma de onda resultante da vibração da máquina em normal funcionamento para o qual foram projetadas e quando colocadas em funcionamento obedecendo às especificações técnicas e requisitos do fabricante.

O nível de vibração em “bom funcionamento” deve ser obtido nas primeiras utilizações, para que o sinal capturado seja o mais límpido possível, e não poluído por sinais de desgaste, o sinal será guardado como assinatura espectral da máquina e utilizado nas medições de vibração, como referência para comparação, durante todo o tempo de vida útil. Assume-se que a assinatura espectral da máquina é obtida com a máquina instalada corretamente, pois se esta se encontrar com uma instalação defeituosa, automaticamente a assinatura espectral só por si incorpora defeitos que nunca serão identificados, o ideal seria que os fabricantes fornecessem essa assinatura juntamente com o equipamento, mas tal idealismo não é de fácil obtenção para a enorme oferta de máquinas no mercado, por tal temos que obter a assinatura de cada máquina com sentido crítico e da melhor forma possível.

Com o desgaste do passar dos tempos, a assinatura espectral é afetada por problemas capazes de provocar a avaria, e vai sofrer alterações de amplitude ou frequência, podendo ser de origem elétrica ou mecânica. As alterações detetadas, indicam que algo está anormal e é sobre estas que temos que incidir e tentar suprimir.

O *Diagnóstico de Máquinas Elétricas pela Análise da Vibração* procura identificar e medir o desvio em relação à *assinatura espectral* e atribuir esse desvio ao problema que deu origem, para isso será necessário vencer as etapas:

1. Captação do nível de deslocamento axial e radial que um corpo sofre sobre um ponto de referência, vibração mecânica, através do acelerómetro e transformação num sinal elétrico.
2. Definir qual a melhor *interface* disponível no portátil para o efeito, assim como a eventual construção de uma montagem eletrónica de *buffer* de adequação dos níveis do sinal emitido pelo acelerómetro, sem a inserção de ruído distorção, para níveis saudáveis à *interface* escolhida caso aplicável.

3. Após entrada do sinal no portátil, com recurso ao *software Matlab*® é criada uma aplicação para tratamento do sinal e interface com o utilizador.
  - 3.1. Na aplicação é necessário carregar o sinal capturado e usar o mesmo como *assinatura espectral*.
  - 3.2. É necessário transformar o sinal analógico amplitude x tempo num sinal amplitude x frequência, a passagem será com recurso às transformadas contínuas e discretas de Fourier explicadas no capítulo 4.7
  - 3.3. É necessário comparar a *assinatura espectral* com o estado/sinal atual e detetar os desvios.
  - 3.4. Atribuir os desvios a problemas ou desgastes.
  - 3.5. Disponibilizar ao utilizador o diagnóstico identificando e dando a conhecer os problemas onde devem recair as operações de manutenção.

Cumpridas com êxito as etapas, o projeto oferece ao utilizador um diagnóstico objetivo e prático que assume extrema importância para perceção do estado dos componentes para que sejam realizadas substituições ou agendamento de operações de manutenção, sem que para isso sejam necessários grandes investimentos na compra de equipamentos de diagnóstico.



## 2 Estado da Arte

Existe no mercado de manutenção, equipamentos de processamento e tratamento de sinais de vibração que conseguem apresentar resultados surpreendentes.

### 2.1.1 FLUKE 810

É possivelmente o dispositivo mais completo e versátil para equipas de manutenção mecânica que precisam de respostas rápidas e realizam diagnósticos de máquinas elétricas pela análise de vibração, foi desenvolvido pela *Fluke Corporation, S.A* e o seu preço de tabela situa-se nos 10550€, o valor resulta da consulta aos fornecedores *Bresimar Automação, S.A.* e *MRA Instrumentação, S.A.*

O medidor de vibrações *Fluke 810* ao empregar um processo de questionário e instruções passo-a-passo simples, cria uma apresentação gráfica para o ajudar a introduzir de uma forma profissional os sensores e identifica avarias nas máquinas na primeira vez que se efetuam medições, sem histórico de medições prévio. A combinação de diagnósticos, gravidade e recomendações de reparação ajuda os utilizadores a tomar melhores decisões de reparação e a tratar dos problemas críticos primeiro.



Figura 1 - Medidor de vibraçãõ Fluke 810.

O *Fluke 810* apresenta como principais vantagens:

- Identificação e localização das avarias mecânicas mais comuns (rolamentos, desalinhamento, desequilíbrio, desaperto) que permitem concentrarem os esforços de

manutenção na causa do problema, reduzindo, assim, o tempo de inatividade imprevisto;

- Escala de gravidade da avaria com quatro níveis de gravidade para ajudá-lo a organizar por ordem de prioridade os trabalhos de manutenção;
- Recomendações de reparação que aconselham os técnicos acerca das ações corretivas a tomarem;
- Permite guardar diagnósticos;
- Tacómetro<sup>1</sup> a laser que define com precisão a velocidade de funcionamento da máquina e assegura diagnósticos de confiança;
- Acelerómetro triaxial que reduz os tempos de medição em 2/3 em comparação com acelerómetros de eixo único;
- *Software Viewer* para PC que expande a capacidade de armazenamento de dados e de rastreabilidade;
- Examinar o equipamento antes e depois da manutenção planeada e confirmar a reparação;
- Colocar em serviço equipamentos novos e assegurar a sua instalação correta;
- Fornecer provas quantificáveis do estado do equipamento e sinalizar investimentos em reparações ou substituições;
- Organizar por ordem de prioridade e planear atividades de reparação, gerando mais eficiência;
- Antecipar avarias no equipamento antes de estas terem lugar e controlar os inventários de peças sobresselentes;

Como limitações o *Fluke 810* tem algumas mas de pouco relevo, a principal limitação prende-se pelo facto de ser necessário existir contacto com o corpo que se pretende analisar, o que em algumas situações torna-se difícil devido às carcaças de proteção ou produção, o elevado custo de aquisição é também uma limitação para uma empresa de pequena dimensão.

Existem mais marcas de fabricantes de aparelhos de medição que incorporam na sua lista portefólio equipamentos com tecnologia idêntica ao *Fluke 810*, não são abordados pois porque o princípio é o mesmo e os valores também.

---

<sup>1</sup> Aparelho usado para medir as rotações por minuto.

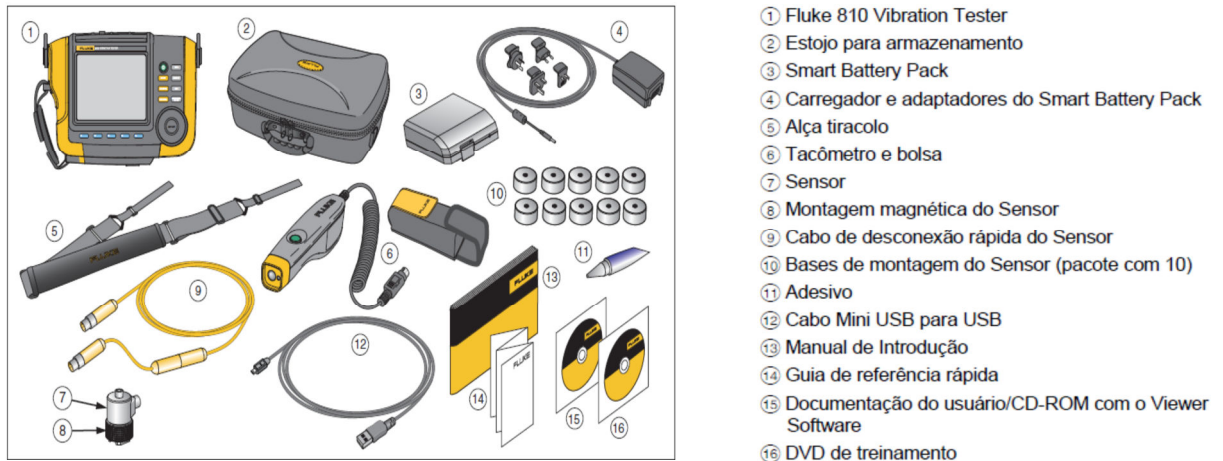


Figura 2 - Composição do pack Fluke 810.



Figura 3 - Utilização prática do Fluke 810 (QEnergia, 2012).

### 2.1.2 Vibrometria Laser/Ótica

A vibrometria laser apresenta vantagens em relação a tecnologia convencional, pois realizam medições de vibrações sem contato, não introduzem massas no sistema, medições a longa distância, alta precisão e sensibilidade, montagem simples e de fácil operação; o custo da sua aquisição até momento é desconhecido, mas é extremamente elevado.

A tecnologia de vibrometria laser é recente e está a revolucionar com alguma rapidez o desenvolvimento do projeto e análise modal experimental na indústria automóvel.

A tecnologia está a ser estendida para as mais difíceis tarefas de medição, como estruturas quentes, complexas ou microscópicas.

Principais sistemas de vibrometria disponíveis (Vibração, 2012):

- Ponto único
- Medição Diferencial
- Rotação
- Medição em plano
- Medição de alta velocidade
- Medição de alta frequência
- Vibrometria 3D
- Sistemas microscópios
- Exploração (“Escaneamento”)
- Software de aquisição

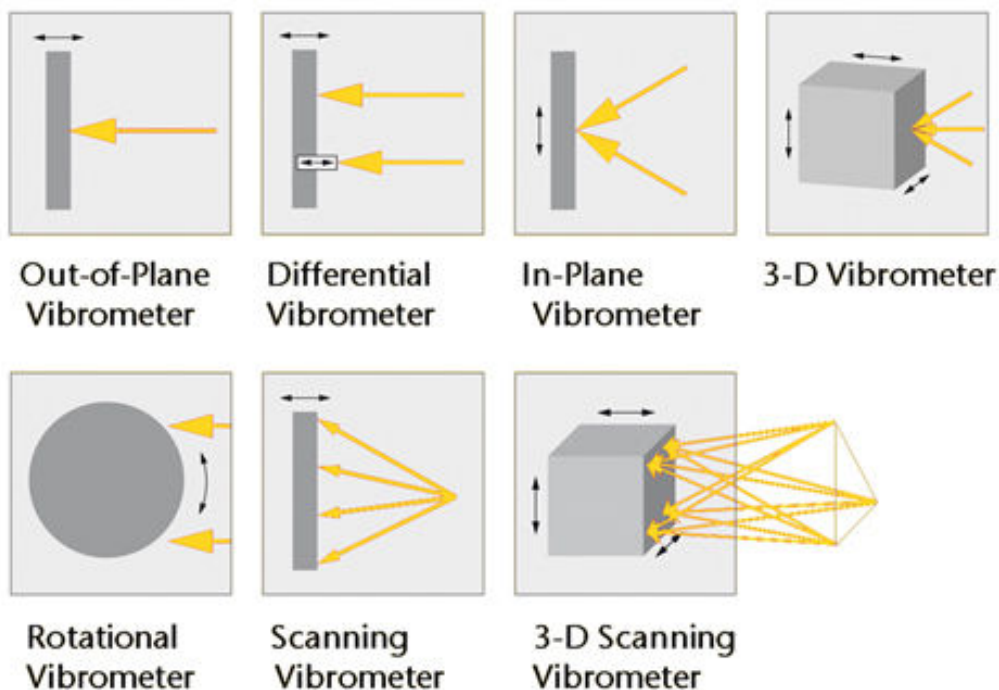


Figura 4 - Ilustração de alguns dos sistemas de vibrometria, (Ometron Ltd., 2012).

O VPI 4000 (Vibration Pattern Imaging) da norte americana Ometron Ltd, é um sistema que combina um vibrômetro<sup>2</sup> a laser de efeito Doppler com um *software* em *MS Windows* realizando medição e análise de vibrações. A Figura 5 mostra o sistema com sensor e hardware (Ometron Ltd., 2012).

<sup>2</sup> Aparelho destinado a medir vibrações mecânicas



Figura 5 - Sistema VPI 4000 com sensor e hardware (Ometron Ltd., 2012)

O equipamento está baseado num interferômetro de *Michelson*<sup>3</sup> no qual a luz emitida pelo laser se divide em uma luz de referência e uma luz de sinal. A luz de sinal é dirigida para a estrutura vibratória e a luz refletida é combinada com a luz de referência. Quando a estrutura se move, a diferença de trajetórias entre as luzes do sinal e da referência muda resultando em uma modulação de intensidade da luz recombinada devido à interferência entre ambas as luzes. Um ciclo completo da modulação da intensidade corresponde a um movimento da superfície igual à metade do comprimento de onda  $\lambda$  (o comprimento de onda de uma fonte laser néon-hélio é  $0,632 \mu\text{m}$ ). A frequência da modulação de intensidade  $f_d$  relaciona-se com a velocidade da superfície  $v$  através da expressão

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad \text{Equação 2.1}$$

em que  $f_d$  é chamada de frequência Doppler<sup>4</sup>. A luz recombinada é dividida em dois canais de detecção independentes configurados de forma que os dois sinais obtidos apresentam uma diferença de fase de  $\pm 90^\circ$ , dependendo do movimento da superfície. É realizada uma mixagem eletrônica destes sinais com uma frequência portadora, gerando um único sinal com frequência Doppler desfasada que é, então, convertido em uma voltagem analógica diretamente proporcional à velocidade instantânea da superfície em movimento. A principal vantagem da medição ótica é que ela é realizada sem contato, eliminando a influência que os sensores anexados à estrutura vibratória produzem na própria vibração medida. As formas vibratórias podem ser facilmente observadas nas medições realizadas com efeito Doppler. A

<sup>3</sup> Aparelho utilizado para efetuar medidas de ângulos e distâncias aproveitando a interferência de ondas eletromagnéticas que ocorre quando estas iteram entre si.

<sup>4</sup> Doppler é uma característica observada nas ondas quando emitidas ou refletidas por um objeto que está em movimento com relação ao observador.

Figura 6 apresenta um exemplo de uma medição realizada evidenciando-se os níveis de vibrações com cores diferentes. Sendo de baixa potência, não apresentam qualquer risco ao operador.

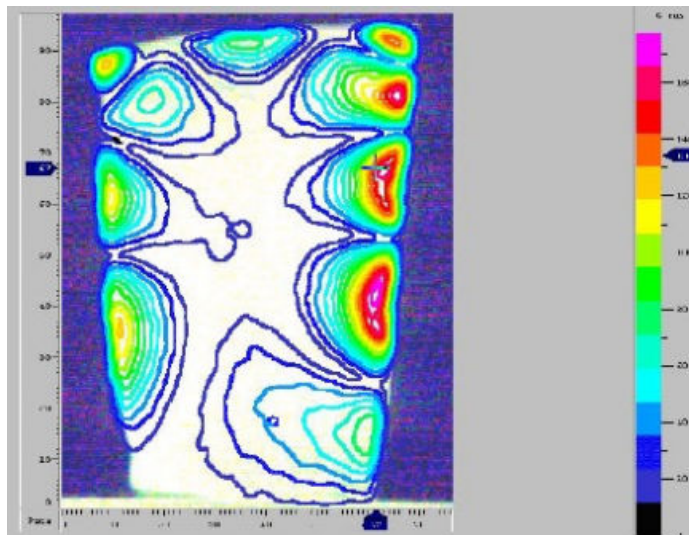


Figura 6 - Imagem produzida por leitura a laser, (Ometron Ltd., 2012)

As variações nas características vibratórias de materiais, componentes e estruturas podem ser utilizadas para detetar defeitos, falhas, fissuras, descolamentos de camadas e outras anomalias estruturais. As potencialidades de medições oferecidas pelos métodos óticos, associados à completa abrangência dos dados coletados pelos sensores VPI proporcionam uma poderosa ferramenta de teste não destrutivo que pode ser usada para análise *in-situ* ou em laboratório. Esta flexibilidade operacional permite que se elaborem programas de teste em condições normais de serviço, (Ometron Ltd., 2012).

## **3 Manutenção**

Pode ser definida como o conjunto de ações que permitem manter ou controlar o estado original de funcionamento de um equipamento ou bem.

### **3.1 Introdução**

Todo o equipamento ou bem está sujeito a um processo de deterioração, especialmente se estiver em atividade ou funcionamento, para o qual foi concebido (AEP, 2003).

Para que a produtividade de uma instalação fabril, constituída por uma diversidade enorme de equipamentos ou bens, tenha resultados positivos, é necessário que todos eles sejam mantidos nas melhores condições de funcionamento (AEP, 2003).

Assim, todo esse equipamento deverá sofrer, ao longo da sua vida útil de funcionamento, reparações, inspeções programadas, rotinas preventivas programadas e adequadas, substituição de peças e órgãos, mudanças de óleo, lubrificações, limpezas, pinturas, correções de defeitos resultantes quer do seu fabrico quer do trabalho que estiver a realizar (AEP, 2003).

O conjunto de todas estas ações constitui aquilo a que se chama manutenção (AEP, 2003).

A manutenção, reputada de tarefa secundária e dispendiosa, alvo de reduções fortes em tempo de crise ou em situações económicas difíceis, passou, então, pelos custos das suas intervenções, a ser considerada fator determinante na economia das empresas, capaz de alterar radicalmente os índices de produtividade, a livre concorrência e o aumento de produção por empregado (AEP, 2003).

### **3.2 Definição de Manutenção**

De uma outra forma, pode definir-se manutenção como o conjunto das ações destinadas a garantir o bom funcionamento dos equipamentos, através de intervenções oportunas e corretas, com o objetivo de que esses mesmos equipamentos não avariem ou baixem de

rendimento e, no caso de tal suceder, que a sua reparação seja efetiva e a um custo global controlado (AEP, 2003).

De forma mais abrangente, poderemos dizer que manutenção de um equipamento ou bem é um conjunto de ações realizadas ao longo da vida útil desse equipamento ou bem, de forma a manter ou repor a sua operacionalidade nas melhores condições de qualidade, custo e disponibilidade, de uma forma segura (AEP, 2003).

### 3.3 Informações Históricas de Manutenção

Até 1940, o conceito era reparar as falhas, após ocorrência da avaria. Posteriormente os EUA lançaram a manutenção preventiva como uma nova técnica revolucionária, para manter a performance dos equipamentos.

Este tipo de manutenção teve como foco o tempo, predefinindo intervalos de tempo entre as manutenções. Também tinha como regra, a substituição de peças e componentes e nesses intervalos mesmo que estes se encontrem em bom estado.

Enquanto em 1950, o processo de manutenção preventiva ou manutenção baseada no tempo se afirmava na indústria, nasce no meio industrial a manutenção orientada para performance e desempenho, também conhecida como manutenção baseada nas condições em que se encontra o equipamento. A manutenção com base no tempo e a manutenção com base na condição são baseadas na técnica preditiva.

Em 1960, aparecem no meio industrial, com grande relevo, os conceitos de fiabilidade, segurança e rentabilidade económica para aplicação nas indústrias, conhecido como manutenção do sistema de produção.

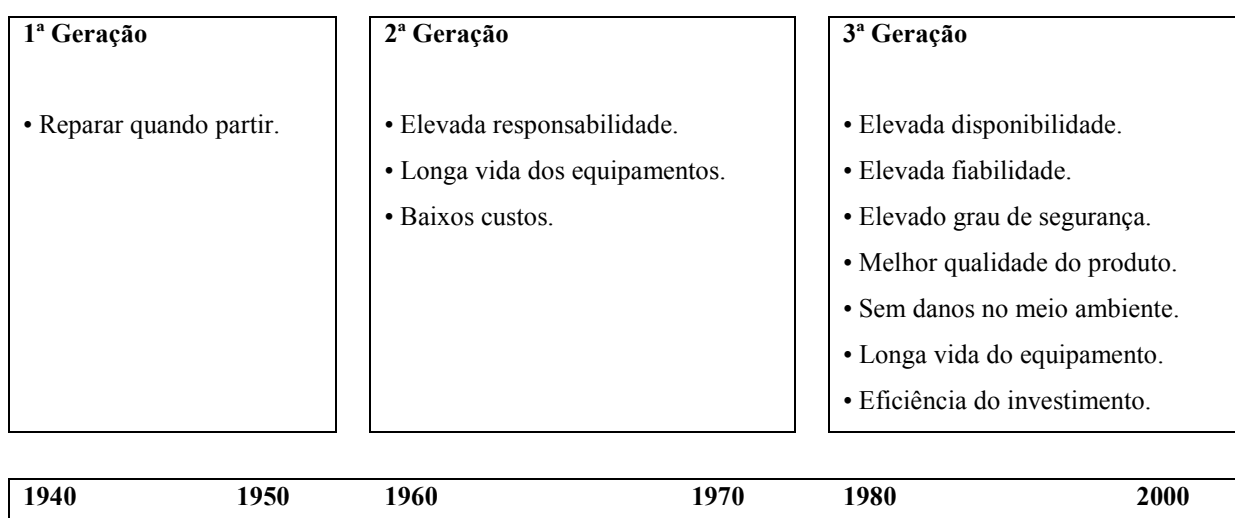


Figura 7 - História da Manutenção, fonte (AEP, 2003).

### **3.4 Qual o Objetivo da Manutenção**

O objetivo principal é a obtenção de níveis produtivos elevados dos equipamentos ou bens. Devemos, contudo, ter em atenção os fatores associados ao objetivo e que poderão, de algum modo, criar situações divergentes.

Assim, fatores como a segurança, a qualidade, o custo da reparação e a disponibilidade devem ser fatores de análise importantes (AEP, 2003).

**Analisemos cada um desses fatores importantes foram retirados de (AEP, 2003):**

#### **3.4.1 Segurança**

Abrange genericamente a segurança dos operadores, a segurança dos equipamentos e, de uma forma global, com a segurança da comunidade.

A manutenção tem aqui uma ação importante, pois compete-lhe criar condições para a deteção, avaliação e controlo dos riscos potenciais a que os operadores possam estar sujeitos.

#### **3.4.2 Qualidade**

Todos os equipamentos ou bens devem proporcionar altos rendimentos, com a tendência para o “zero defeito”, nas melhores condições de higiene e proteção ambiental, resultante da operação que está a ser executada.

Também aqui, deverá haver por parte dos responsáveis das empresas (Recursos Humanos) uma ação importante na contratação dos elementos da manutenção, para que a qualidade do serviço prestado seja otimizada. Assim, deverão ser considerados os seguintes fatores.

- a) Perfil do elemento contratado;
- b) Treino adequado e específico;
- c) Acompanhamento do desempenho;
- d) Reciclagem programada.

#### **3.4.3 Custo**

Todas as ações de manutenção deverão conduzir à minimização do custo do produto resultante da operação a realizar. Deverá também estar em causa o próprio custo da reparação, pois que poderá não ser já aceitável.



Figura 8 - Custos directos e custos indirectos da manutenção.

### 3.4.4 Disponibilidade

De um modo geral, todos os equipamentos deverão estar disponíveis para a produção, bem como deverá ser reduzido ao mínimo o seu tempo de imobilização, quer devido a falhas no planeamento da produção quer devido a avaria ou paragem forçada.

Disponibilidade de um equipamento é definida como a percentagem do período em que este se encontra em condições de efetuar a operação esperada e pré-definida. Este índice é calculado usando os restantes indicadores referidos anteriormente, através da expressão:

$$Disponibilidade = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR + MWT)} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde MTBF (*Mean Time Between Failures*) é o tempo médio entre avarias, MTTR (*Mean Time To Repair*) é o tempo médio de reparo e MWT (*Mean Waiting Time*) é o tempo médio de espera.

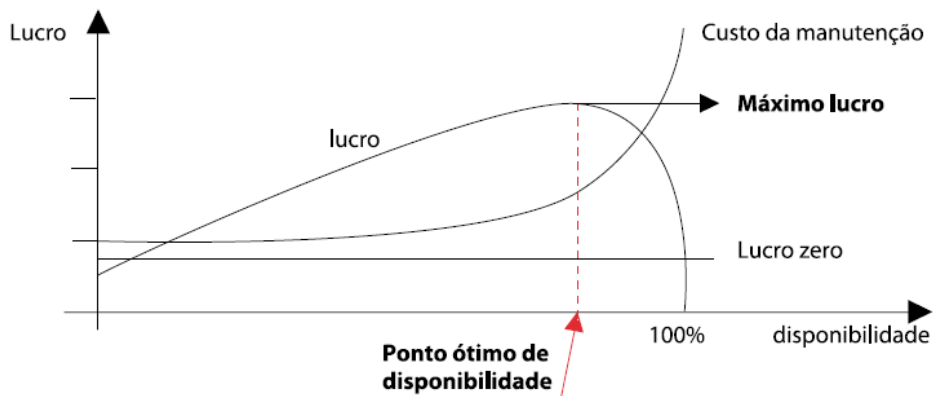


Figura 9 - Lucro versus disponibilidade (Murty, 1995)

### 3.5 Importância da Manutenção

Aos problemas tradicionais vieram juntar-se agora as economias de energia, a conservação do meio ambiente, a renovação dos equipamentos e das instalações, a fiabilidade, a manutabilidade, a eficácia, a otimização dos processos industriais, a sua própria qualidade e a valorização dos seus técnicos (AEP, 2003).

Sente-se uma importância crescente da manutenção como um dos vetores fundamentais da economia das empresas.

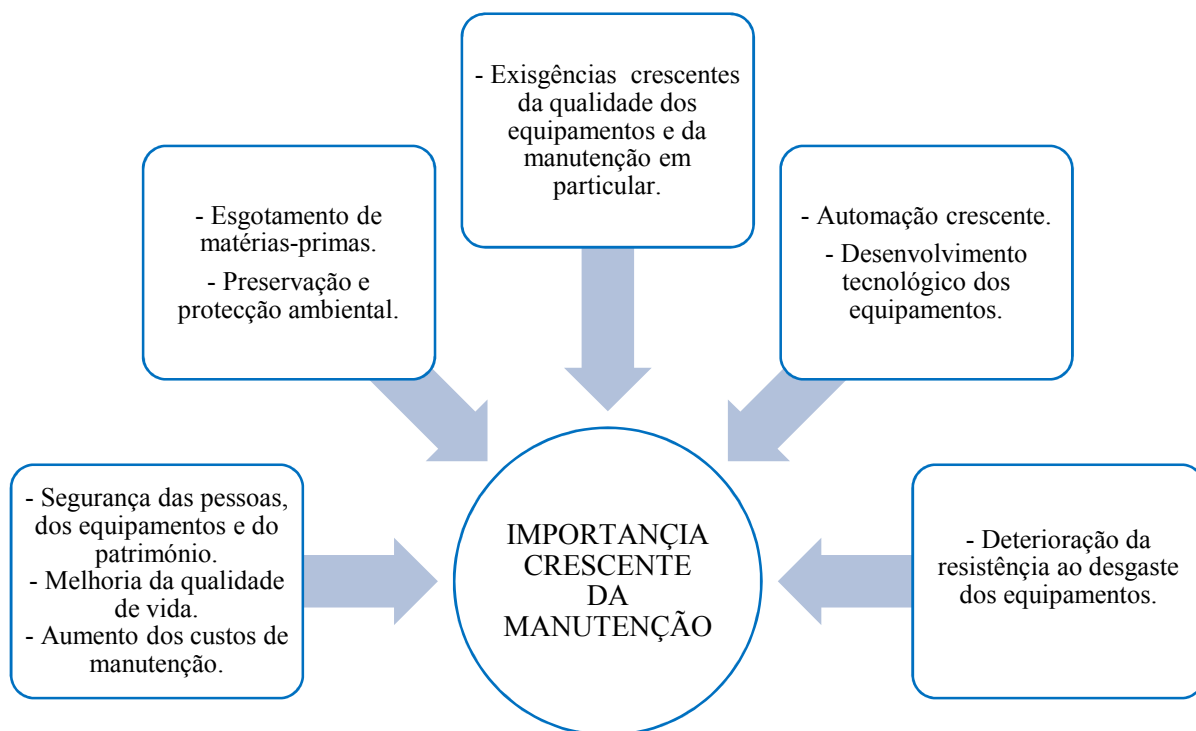


Figura 10 - Importância da manutenção, editado de (AEP, 2003).

### 3.6 Metodologias de Manutenção

A manutenção de máquinas elétricas, encontra suporte em diferentes metodologias, a Figura 11 refere que tais técnicas são agrupadas em 3 grupos metodológicos, sendo, manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.



Figura 11- Identificação das metodologias e enquadramento do projeto.

É necessário percorrer as diferentes metodologias para enquadrar nestas, o *Diagnóstico de Maquinas Eléctricas pela Análise de Vibrações* e assim perceber o seu contributo como ferramenta de diagnóstico.

### 3.6.1 Manutenção Reativa (ou Correctiva)

É a manutenção que ocorre após a avaria do equipamento. Atua somente após a ocorrência da falha (Confiabilidade - Manutenção Preditiva).

Segundo (Beneditti, 2002) este tipo de manutenção supõe que todas as partes do equipamento são identificadas a quando o reparo, como sendo as únicas necessárias. Se um componente falhar, as peças necessárias à reparação nem sempre estão disponíveis, ocorrendo atrasos para a sua aquisição e daí os custos da não-produção.

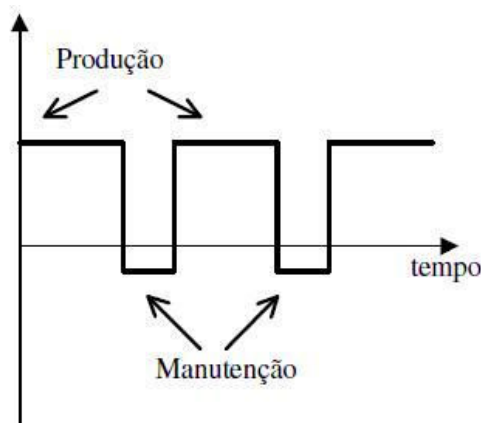


Figura 12 - Princípio da manutenção reativa. (Teknikao, 2012)

### 3.6.2 Manutenção Preventiva

É o tipo de manutenção onde se retira a máquina de serviço, obedecendo a um programa de manutenção pré-definido por estudos estatísticos e confronta estes estudos com o tempo de trabalho.

Consiste em determinar a "vida útil" do equipamento e passar a realizar a manutenção em intervalos de tempo definidos por um programa de intervenção, sem conhecimento da condição real da peça ou necessidade real de se realizar a intervenção, e até com possibilidade de inserção de um defeito, que antes não existia na máquina (Confiabilidade - Manutenção Preditiva), (Beneditti, 2002).

As intervenções são programadas em intervalos fixos e são executadas tarefas como: ajustes, limpezas, repetição de lubrificações, calibrações, e reparos quando assim é necessário.

As intervenções visam a redução da possibilidade de ocorrência de falhas nos equipamentos. O *feedback* das inspeções periódicas, pode alterar o calendário das intervenções pré estabelecidas, serve de guia para determinar o intervalo da tarefa.

Gera intervenções desnecessárias, aumentos dos custos e não garante uma manutenção eficiente ou necessária (Confiabilidade - Manutenção Preditiva)

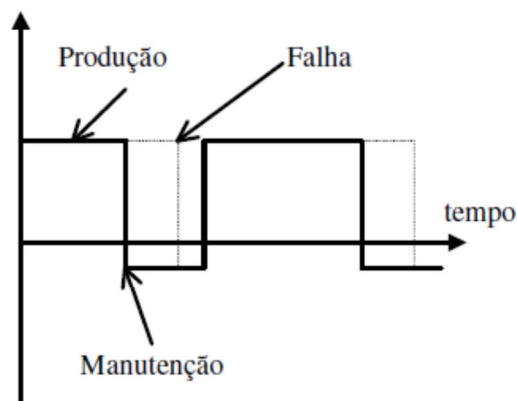


Figura 13 - Princípio da manutenção preventiva, (Teknikao, 2012).

### 3.6.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva consiste no controlo da máquina em serviço, usando instrumentos de medição para que na presença de uma irregularidade ou variação da condição de operação sejam desencadeadas operações de manutenção adequadas.

Consiste em acompanhar o estado real dos diversos componentes através da monitorização de parâmetros, tais como:

- Análise de Vibrações
- Temperatura
- Análise de Lubrificantes
- Ruídos
- Termografia
- Análise das variáveis elétricas
- Propriedades físico-químicas.
- Cromatografia gasosa<sup>5</sup>.
- Espectrometria<sup>6</sup>.
- Ferrografia<sup>7</sup>.
- Radiografia.
- Energia acústica (ultra-som).
- Energia Eletromagnética (partículas magnéticas, correntes parasíticas).
- Fenômenos de viscosidade (líquidos penetrantes).
- Radiações ionizantes (Raio X ou Gamagrafia).

Entre os parâmetros referidos destacam-se três: análises de lubrificantes (quando aplicável), termografia e monitorização da vibração.

Com o conhecimento dos parâmetros, basta programar uma intervenção quando alguns dos parâmetros indicarem a necessidade da mesma (Confiabilidade - Manutenção Preditiva).

Esta técnica teve início, no final da década de 1950 e início de 1960, com os estudos voltados às vibrações e ruído. Até então tudo era visto como ruído, as máquinas e equipamentos tinham seu controle no nível de ruído. Contudo, a partir desta época, passou-se a usar a análise e Monitorização de vibração como elemento essencial para indicação da performance

---

<sup>5</sup> Cromatografia Gasosa é um teste de pureza de uma substância em particular, ou separação de diversos componentes de uma mistura.

<sup>6</sup> Espectrometria é um conjunto de recursos que nos permite identificar a estrutura das partículas que constituem as substâncias.

<sup>7</sup> A ferrografia é uma técnica laboratorial de manutenção preditiva para o monitoramento e diagnose de condições de máquinas. A partir da quantificação e análise da morfologia das partículas de desgaste (limalhas), encontradas em amostras de lubrificantes, determinam-se: tipos de desgaste, contaminantes, desempenho do lubrificante.

dos equipamentos. A vibração ganhou foco e começou a ser evidenciada no meio industrial como uma técnica, para manter as condições de funcionalidade de máquinas e equipamentos (Beneditti, 2002).

Outras terminologias têm surgido como ferramentas de gerenciamento /gestão de manutenção, estes novos termos:

- RCM (manutenção centrada na confiabilidade);
- TPM (manutenção produtiva total);
- JIT (manutenção "Just-in-Time").

são apresentadas como substitutas à manutenção preditiva e a solução definitiva aos seus altos custos de manutenção.

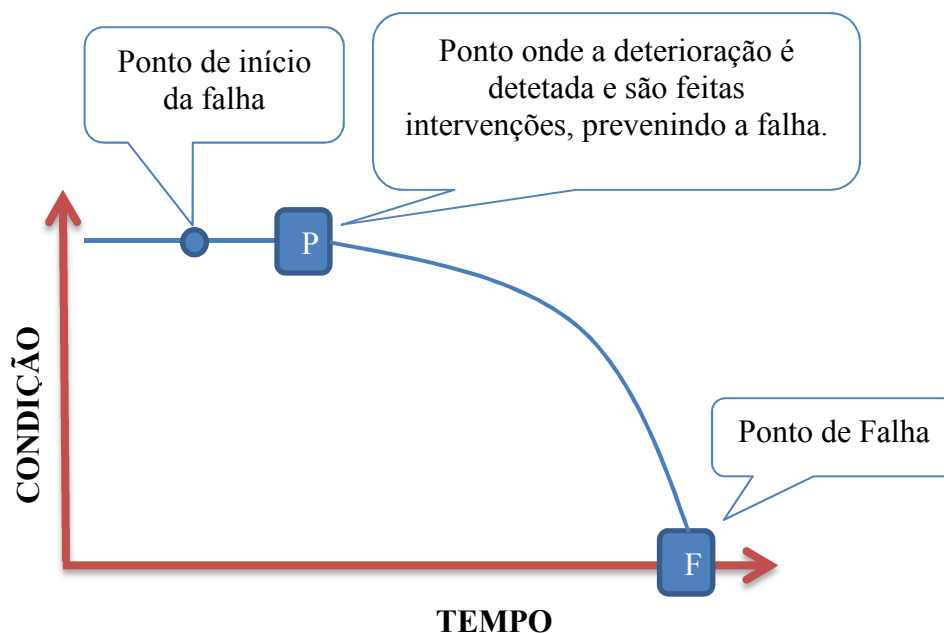


Figura 14 - Comportamento de Falha.

### 3.7 Principais Técnicas Preditivas

Pretendem antecipar e determinar o ponto ótimo para executar a manutenção preventiva num equipamento, ou seja, o ponto a partir do qual a probabilidade do equipamento falhar e assumir valores indesejáveis. A determinação desse ponto traz como resultado índices ideais de prevenção de falhas, tanto sob o aspeto técnico como pelo aspeto económico.

### **3.7.1 Sensitiva**

A técnica sensitiva procura identificar falhas de montagem, vazamentos, fontes de desperdícios, algumas situações ligadas à segurança das pessoas e ao meio ambiente.

Técnica altamente especializada, já que utiliza os sentidos do corpo humano (visão, audição, olfato e tato) aliados a instrumentos que conduzem a um diagnóstico mais preciso, pois evidenciam e realçam esses sentidos (ampliam o nosso nível de percepção), esses instrumentos, podem ser por exemplo, a luz estroboscópica, fotosensores, termômetros, etc.

### **3.7.2 Análise de Vibração**

Técnica baseada na recolha de informação proveniente da análise da vibração mecânica, na generalidade são técnicas que fazem uso de um sensor mecânico, tipicamente um acelerómetro, capaz de que emitir sinais elétricos variados conforme a vibração do sistema.

A análise de vibração para se tornar ferramenta de ajuda e diagnóstico necessita de um analisador de vibrações (conectado ao acelerómetro), a referida composição possibilita diagnosticar falhas do sistema e atribuir às mesmas um nível, que pode estar ou não num nível tolerável. No capítulo 5 são abordadas normas que definem o que é uma vibração aceitável.

Esta técnica depende da habilidade do operador em posicionar o sensor mecânico (para apenas uma análise devem ser recolhido sinais de diversos pontos), excluir possíveis vibrações externas e analisar o resultado da forma correta (Soledade, 2006).

Existem sistemas de análise *online*, porém existe a desvantagem da obrigatoriedade de fixação do conversor (acelerómetro) no motor. Em determinadas aplicações, existe, inclusive, a necessidade de maquinagem do chassi da máquina, viabilizando a fixação do conversor, inserindo assim o sensor no próprio chassi (Soledade, 2006).

### **3.7.3 Termografia**

Técnica que retrata a análise a diferença de temperaturas, a diferença de temperatura é visualizada na vertente gráfica e traduz o sobreaquecimento de elementos da canalização elétrica ou mecânica.

Técnica bastante eficaz, embora as câmaras termográficas utilizadas para a obtenção de imagens detalhadas, são ainda muito caras e requerem uma certa experiência para sua operação (Soledade, 2006).

É uma técnica interessante para a detecção de degradação em isoladores, parafusos de conexão, conectores, contactores e disjuntores, pois os defeitos nestes tipos de componente causam grande variação de temperatura (Soledade, 2006).

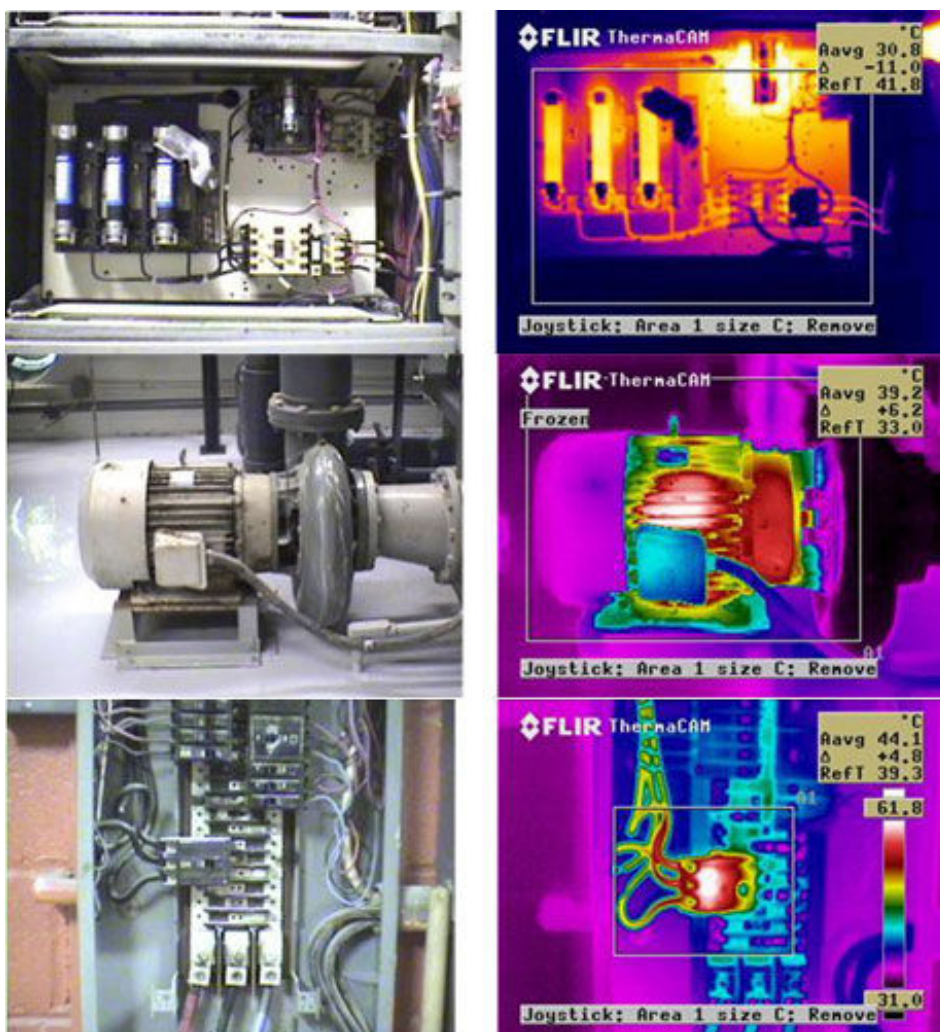


Figura 15 - Imagens obtida através de uma camera termografica Flir i-7.

### 3.7.4 Análise do Óleo

Técnica voltada para a análise dos óleos que tem como meta dois objetivos, o de economizar lubrificantes e evitar desgastes por atrito de interação dos vários componentes.

Os equipamentos mais atuais permitem análises exatas e rápidas dos óleos utilizados em máquinas. É por meio das análises que o serviço de manutenção pode determinar o momento adequado para sua troca ou renovação (Confiabilidade - Manutenção Preditiva).

A economia é obtida com a regulação do nível do grau de degradação ou de contaminação dos óleos. Essa regulação obedece a critérios definidos e permite a otimização dos intervalos das trocas (Confiabilidade - Manutenção Preditiva).

A análise dos óleos permite, também, identificar os primeiros sintomas de desgaste de um componente. A identificação é feita a partir do estudo das partículas sólidas que ficam misturadas com os óleos. Tais partículas sólidas são geradas pelo atrito dinâmico entre peças em contacto (Confiabilidade - Manutenção Preditiva) .

A análise dos óleos é feita por meio de técnicas laboratoriais que envolvem vidrarias, reagentes, instrumentos e equipamentos. Entre os instrumentos e equipamentos utilizados temos viscosímetros<sup>8</sup>, centrífugas<sup>9</sup>, fotômetros de chama, peagômetros<sup>10</sup>, espectrômetros<sup>11</sup>, microscópios etc, (Confiabilidade - Manutenção Preditiva). Com os recursos referidos analistas pode determinar as propriedades dos óleos e o grau de contaminantes neles presentes.

As principais propriedades dos óleos que interessam em uma análise são:

- Índice de viscosidade;
- Índice de acidez;
- Índice de alcalinidade;
- Ponto de fulgor;
- Ponto de congelamento.

E em termos de contaminação dos óleos, interessa saber quanto existe:

- Resíduos de carbono;
- Partículas metálicas;
- Água.

Assim como o estudo das vibrações, a análise dos óleos é muito importante na manutenção preditiva. É a análise que vai dizer se o óleo de uma máquina ou equipamento, elemento

---

<sup>8</sup> Um viscosímetro, também designado por viscómetro, consiste num instrumento usado para medição da viscosidade de um fluido.

<sup>9</sup> São equipamentos que aplicam a força centrífuga relativa em determinado objeto através da rotação do mesmo em torno de um eixo.

<sup>10</sup> Instrumento utilizado para a medição do pH de uma solução.

<sup>11</sup> Instrumento óptico utilizado para medir as propriedades da luz em uma determinada faixa do espectro eletromagnético.

essencial para um bom funcionamento, precisa ou não ser substituído e quando isso deverá ser feito.

### **3.7.5 Objetivos da Manutenção Preditiva**

- Determinação do momento em que deve ser efetuado um trabalho de manutenção em alguma peça específica de uma máquina em operação;
- A eliminação da desmontagem para inspeções de rotina;
- O aumento do período de disponibilidade da máquina;
- A redução das intervenções de emergência e não planeadas;
- A prevenção do crescimento de danos na máquina e no sistema;
- O aproveitamento dos componentes da máquina durante toda a sua vida útil;
- O aumento da confiabilidade da máquina dentro do processo;
- A programação antecipada de paralisação dos equipamentos.

O que se pode esperar na adoção da modalidade é um funcionamento fiável, a redução de danos provocados por falhas e minimização dos custos que a manutenção agrega.

## **3.8 Resumo das Metodologias**

A metodologia de manutenção que se vai adotar deve depender do tipo de serviço a ser executado pela máquina, do seu grau de importância no processo de produção, das características construtivas da máquina, em resumo, existem razões técnicas e económicas que justificam a adoção de uma das três modalidades abordadas neste capítulo.

Existe ainda um outro tipo de manutenção sendo a manutenção proactiva que procura através do estudo de casos recorrentes, determinar a causa raiz dos problemas e procurar uma solução definitiva, a mesma não foi abordada pois não é uma manutenção usual e aplicável pois todos os equipamentos ou bens têm sempre peças de desgaste. Esta manutenção aplica-se a problemas nas linhas de produção e não a máquinas elétricas.



Figura 16 - Diagrama de metodologias de manutenção.

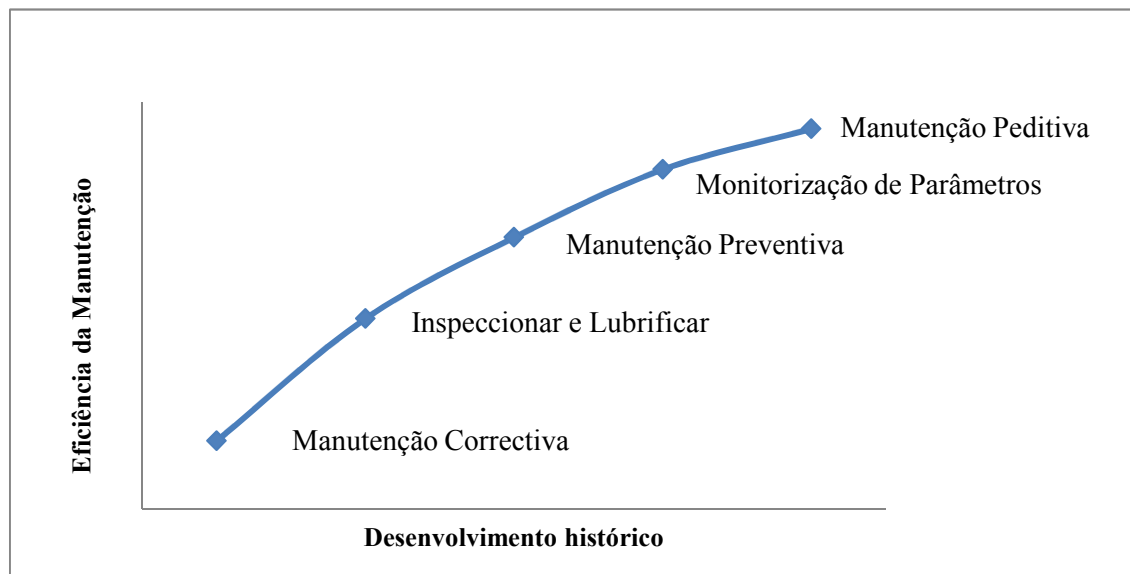


Figura 17 - Comparação da eficiência da manutenção ao longo da sua evolução.

**Em conclusão verifica-se que o diagnóstico de máquinas elétricas pela análise de vibração pode ser uma maior valia na manutenção atual e encontra o seu enquadramento na manutenção preditiva.**

## 4 Vibração

Entende-se por vibração, um movimento oscilatório em torno de um ponto referência. A vibração num equipamento industrial, pode ser tanto um sinal como a fonte de problemas. Outras vezes, a vibração poderá apenas ser uma consequência da operação de uma máquina, não devendo causar qualquer tipo de preocupação.

### 4.1 Introdução

Os níveis de vibrações de uma máquina podem ser representados de várias formas, todavia a maneira mais usual de representação é a espectral ou frequencial, em que a amplitude da vibração é dada de acordo com a frequência.

Na engenharia mecânica, uma das principais aplicações das vibrações está na manutenção. A existência de vibrações em máquinas e equipamentos é, geralmente indicação de mau funcionamento. A manutenção preditiva tem como um dos seus pilares a análise qualitativa e quantitativa das vibrações. Basicamente, o estudo das vibrações requer três passos básicos:

1. A medição da vibração;
2. A análise do sinal vibratório medido;
3. O controlo da vibração, mediante algum procedimento de manutenção.

A análise das vibrações exige que as mesmas sejam perfeitamente identificadas. Isto acontece por meio de um processo de medição. É extremamente importante a correta medição da vibração para que o processo de análise e a consequente correção não sejam comprometidos. A medição serve então para assegurar o bom funcionamento de uma máquina.



Figura 18 - Esquema básico de medição de vibrações.

## **4.2 Escolha do instrumento de medição**

Alguns aspectos devem ser considerados quando se escolhe o instrumento de medição.

### **4.2.1 Faixa de Frequências e Amplitudes**

Um dos principais parâmetros determinantes da escolha do instrumento adequado é a faixa de frequências. Em baixas frequências a amplitude de deslocamento normalmente é alta o que faz com que os vibrômetros sejam adequados para medir as vibrações. Já em altas frequências as amplitudes de deslocamento são baixas e as amplitudes da aceleração são altas fazendo com que os acelerômetros apresentem maior sensibilidade. Os medidores de velocidade são de aplicação geral, pois apresentam desempenho razoável tanto em baixa como em alta frequência. Os medidores de velocidade são também, largamente utilizados por serem de fácil e barata construção. Cada instrumento pode ter suas características adequadas (projeto) para medir faixas específicas de amplitudes e frequências.

### **4.2.2 Tamanho da Máquina ou Estrutura**

Os tamanhos de máquinas e estruturas são importantes, pois instrumentos que possuam grandes massas comparativamente às dos objetos de medição podem influir na medição das vibrações medidas distorcendo-as.

### **4.2.3 Condição de Operação da Máquina**

Condições de funcionamento severas, experimentadas por máquinas que operam em ambientes corrosivos ou abrasivos, por exemplo, podem impedir que instrumentos sofisticados sejam utilizados. É importante que os instrumentos não sejam danificados no ato da medição, pois isto pode também distorcer os valores medidos.

### **4.2.4 Tipo de Análise dos Dados**

A forma com que os dados gerados serão analisados é fundamental para a escolha do instrumento de medição. Vários detalhes no processo de medição estão condicionados pela análise que será realizada. Isto pode fazer com que determinado instrumento possa ser escolhido, preterindo-se outro mais sofisticado, por apresentar os dados de uma forma mais apropriada para a análise pretendida.

### 4.3 Sensor

Os sensores, transformam variáveis físicas em sinais elétricos equivalentes. Os tipos de sensores dependem, fundamentalmente, da variável que os mesmos transformam. São apresentados nesta seção os principais tipos de sensores e o seu princípio de funcionamento.

#### 4.3.1 Sensores de Resistência Variável

Este tipo de sensor tem um princípio de funcionamento que se baseia na variação na resistência elétrica de um elemento, produzida pelo movimento. O movimento gera a deformação de uma resistência elétrica, alterando suas características de forma a produzir uma variação da voltagem de saída do circuito elétrico do qual este elemento faz parte. O sensor mais utilizado deste tipo é o extensômetro cujo esquema é mostrado na Figura 19.

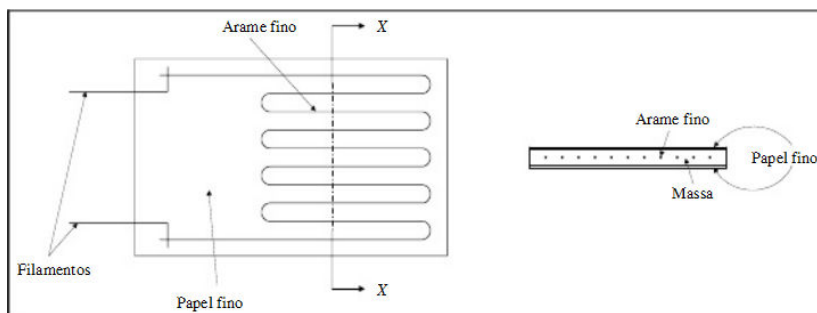


Figura 19 - Extensômetro.

Um extensômetro elétrico consiste de um arame fino cuja resistência varia quando o mesmo é submetido a uma deformação mecânica. Quando o extensômetro é colado a uma estrutura, sofre a mesma deformação que a estrutura e, portanto, a variação na sua resistência indica a deformação sofrida pela estrutura. O arame é montado entre duas lâminas de papel fino. O material com que mais comumente é construída a resistência é uma liga de cobre e níquel conhecida como *Advance*.

Quando a superfície em que o extensômetro foi montado sofre uma deformação normal  $\epsilon$ , o extensômetro também sofre a mesma deformação e a variação em sua resistência é dada por:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta r}{r} \frac{\Delta L}{L} \approx 1 + 2\nu \tag{Equação 4.1}$$

Onde  $K$  é o fator de ponte do arame,  $\Delta R$  a variação da resistência inicial,  $L$  o comprimento inicial do arame,  $\Delta L$  a variação no comprimento do arame,  $\nu$  o coeficiente de Poisson do arame,  $r$  a resistividade do arame e  $\Delta r$  a variação na resistividade do arame. O valor do fator

$K$  é dado pelo fabricante do extensômetro e, portanto, o valor de normal  $\varepsilon$ , pode ser determinado, medindo-se  $\Delta R$  e  $R$ , na forma:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{RK} \quad \text{Equação 4.2}$$

Quando o sensor é usado em conjunto com outros componentes que permitem o processamento e a transmissão do sinal, se transforma em um sensor (*pickup*). Em um sensor de vibração o extensômetro é montado em um elemento elástico de um sistema massa-mola como mostra a Figura 20 (a) A deformação em qualquer ponto do membro elástico (viga engastada-livre) é proporcional à deflexão da massa,  $x(t)$ , a ser medida.

A variação na resistência do arame  $\Delta R$  pode ser medida usando uma ponte de *Wheatstone*, um circuito potenciométrico e um divisor de tensão. Uma ponte de *Wheatstone* típica, representando um circuito que é sensível a pequenas mudanças na resistência, é mostrado na Figura 20 (b). Aplica-se uma voltagem de alimentação d.c.  $V$  entre os pontos  $a$  e  $b$ .

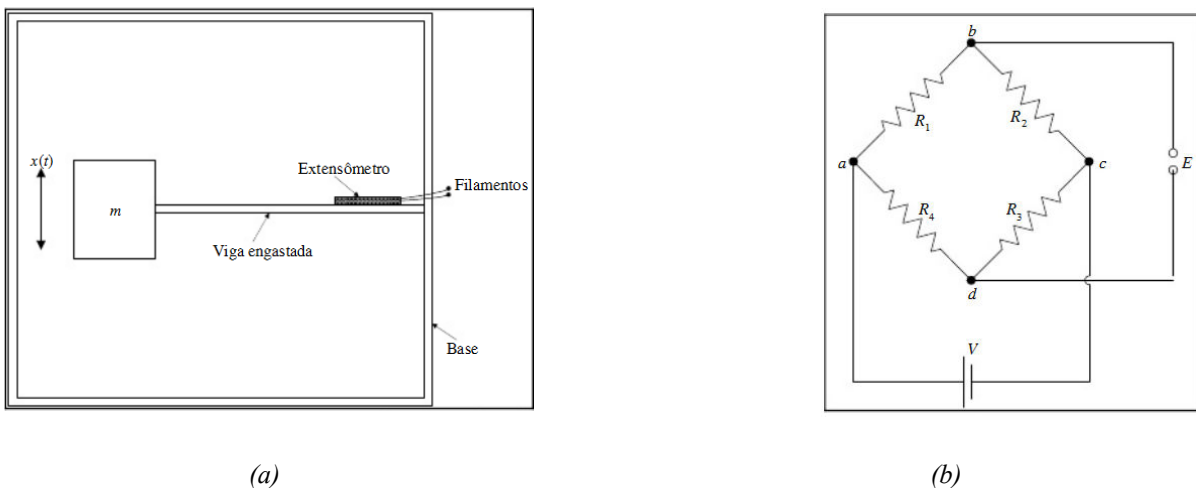


Figura 20 - (a) esquema do sensor, (b) ponte Wheatstone.

A tensão resultante entre os pontos  $b$  e  $d$  é dada por

$$E = \left[ \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right] V \quad \text{Equação 4.3}$$

Inicialmente as resistências são equilibradas, de forma que a tensão de saída é zero. Portanto, para balanço inicial a Equação 3.1 produz

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad \text{Equação 4.4}$$

Quando as resistências ( $R_i$ ) variam em pequenas quantidades ( $\Delta R_i$ ), a variação na voltagem de saída pode ser expressa como

$$\Delta E \approx Vr_o \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{Equação 4.5}$$

Onde

$$r_o = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} = \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} \quad \text{Equação 4.6}$$

Se os terminais do extensômetro são conectados entre os pontos *a* e *b*,  $R_1 = R_g$ ,  $\Delta R_1 = \Delta R_g$ , e  $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$  e a Equação 3.5 nos dá

$$\frac{\Delta R_g}{R_g} = \frac{\Delta E}{Vr_o} \quad \text{Equação 4.7}$$

Onde  $R_g$ , é a resistência inicial do arame. As equações Equação 3.2 e Equação 3.7

$$\frac{\Delta R_g}{R_g} = \varepsilon K = \frac{\Delta E}{Vr_o} \quad \text{Equação 4.8}$$

ou

$$\Delta E = KV r_o \varepsilon \quad \text{Equação 4.9}$$

e, como a voltagem de saída é proporcional à deformação, o instrumento pode ser calibrado para que a deformação possa ser lida diretamente.

### 4.3.2 Sensores Piezoelétricos

Sensores piezoelétricos são aqueles que utilizam materiais naturais ou artificiais, como quartzo, turmalina, sulfato de lítio e sal de Rochelle, que geram carga elétrica quando submetidos a uma deformação (esta é chamada de propriedade piezoelétrica). A carga eléctrica gerada no cristal devido a uma força  $F_x$  é dada por

$$Q_x = K_p F_x = K_p A p_x \quad \text{Equação 4.10}$$

Onde  $K_p$  é chamado de constante piezoelétrica ( $2,25 \times 10^2$ ) Coulomb/Newton para o quartzo, quando a maior face está ao longo do eixo *x* do cristal, Figura 21, *A* é a área em que atua a força  $F_x$  e  $p_x$  é a pressão devida à mesma força. A voltagem de saída do cristal é

$$E = v t p_x \quad \text{Equação 4.11}$$

*v* é a sensibilidade de voltagem (0,055 volt-metro / Newton para o quartzo, também quando a maior face está ao longo do eixo *x* do cristal, Figura 21) e *t* a espessura do cristal.

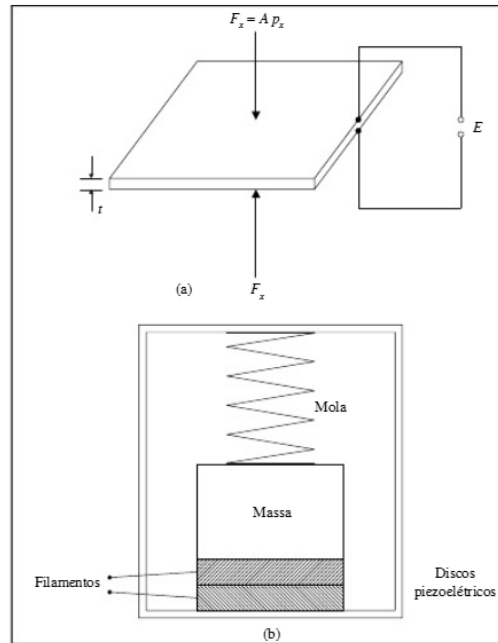


Figura 21 - Acelerômetro Piezoelétrico

A Figura 21 b mostra o esquema de um acelerômetro piezoelétrico. Uma pequena massa é pressionada contra um cristal piezoelétrico por meio de uma mola. Quando a base vibra, a carga exercida pela massa sobre o cristal varia com a aceleração e, portanto, a tensão de saída gerada pelo cristal será proporcional à aceleração. Os acelerômetros piezoelétricos são compactos, resistentes, com alta sensibilidade e utilizáveis vários níveis de frequência.

### 4.3.3 Sensores Eletrodinâmicos

Quando um condutor elétrico, na forma de um solenoide, se move num campo magnético, produzido por um íman permanente ou por um eletroímã, como mostra a Figura 22 é gerada uma tensão  $V$  neste mesmo condutor, dada por

$$V = Dlv \tag{Equação 4.12}$$

Onde  $D$  é a densidade de fluxo magnético ( em Teslas),  $l$  é o comprimento do condutor (em metros), e  $v$  é a velocidade do condutor em relação ao campo magnético ( em metros/segundo). Em virtude da proporcionalidade entre a velocidade relativa entre o íman e solenóide <sup>12</sup> e a voltagem de saída, os sensores electromagneticos são frequentemente utilizados em sensores de velocidade a Equação 3.12 pode ser escrita na forma

<sup>12</sup> Solenoide é a denominação para um condutor enrolado em forma de espiras.

$$Dl = \frac{V}{v} = \frac{F}{I}$$

Equação 4.13

Onde  $F$  é a força que age sobre o solenóide quando pelo mesmo passa uma corrente  $I$ . Desta forma este tipo de sensor pode também ser utilizado como um excitador de vibrações ( a partir de corrente eléctrica intruduzida gera-se uma força mecânica).

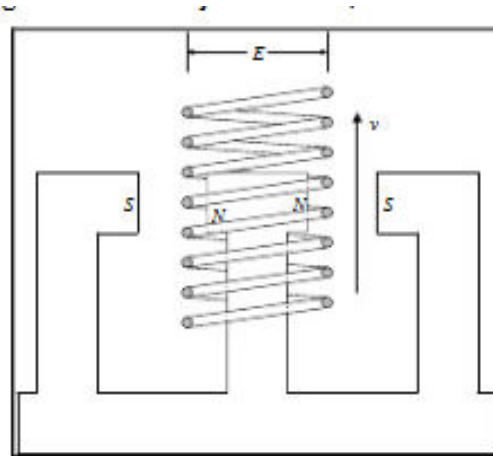


Figura 22 - Sensor eletrodinâmico.

#### 4.3.4 Transformador Diferencial Linear Variável (LVDT)

A

Figura 23 mostra um LVDT que é um sensor que transforma deslocamento em tensão eléctrica. Consiste num enrolamento primário no centro, dois enrolamentos secundários nas extremidades, e um núcleo magnético que se move livremente dentro dos enrolamentos, na direção axial. Quando uma corrente alternada é aplicada no enrolamento primário, a tensão de saída é igual à diferença entre as tensões induzidas nos enrolamentos secundários. Esta tensão depende do acoplamento magnético entre os enrolamentos e o núcleo, que, por sua vez, depende do deslocamento axial do núcleo. Os enrolamentos secundários estão ligados em oposição de fase de forma que, quando o núcleo magnético está exatamente na sua posição média, as tensões nos dois enrolamentos serão iguais e em oposição de fase. Isto faz com que a voltagem de saída do LVDT seja zero. Quando o núcleo é movido para qualquer lado, o acoplamento magnético será aumentado em um enrolamento e diminuído no outro. A polaridade da saída depende, portanto, do sentido do movimento do núcleo magnético. Os LVDT's disponíveis no mercado abrangem faixas de deslocamento entre 0,0002 cm a 40 cm, o que os torna de ampla aplicabilidade. Estes sensores não sofrem influência de variações de temperatura, mas têm limitação em altas frequências por possuírem o núcleo magnético. Desde que o núcleo não se mova demasiadamente do centro do enrolamento primário, a

tensão de saída varia linearmente com o deslocamento do núcleo, originando-se o nome de transformador diferencial variável linear.

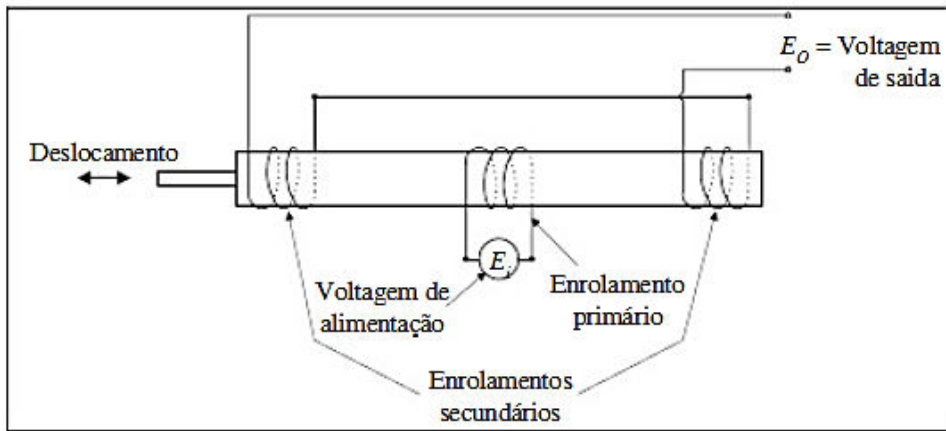


Figura 23 - LVDT

## 4.4 Sensores de Vibração

Um sensor de vibração é um instrumento constituído de um mecanismo medidor associado a um sensor.

### 4.4.1 Vibrômetro

O vibrômetro mede o deslocamento de um corpo vibratório.

### 4.4.2 Acelerómetro

Um acelerómetro é um instrumento que mede a aceleração de um corpo vibratório. Os acelerómetros são amplamente utilizados em medições de vibrações industriais e terremotos. Uma das vantagens da medição da aceleração é que a velocidade e o deslocamento podem ser obtidos por integração.

## 4.5 Grandezas da vibração

A vibração ao ser um movimento engloba 3 grandezas para a sua medição e são: o deslocamento, a velocidade e a aceleração.

#### **4.5.1 Deslocamento**

Expresso em micron ( $\mu\text{m}$ )

#### **4.5.2 Velocidade**

Expressa em mm/s

#### **4.5.3 Aceleração**

Expressa em  $\text{m/s}^2$  ou G's

### **4.6 Frequência de Vibração**

Por frequência entende-se como o número de vezes em que um evento ocorre em um determinado período de tempo.

A frequência de vibração no estudo de máquinas elétricas é normal medida em Hz, CPM e ORDEM.

#### **4.6.1 Hz**

Expressa em Ciclos por segundo

#### **4.6.2 CPM**

Expressa em Ciclos por minutos

#### **4.6.3 ORDEM**

Expressa em Múltiplos da rotação da máquina

### **4.7 Obtenção das Componentes Harmônicas de um Sinal Qualquer**

A análise direta da vibração no tempo, normalmente, não apresenta muita informação útil. Pois apresentam formas de variação complexas ao longo do tempo. É necessária que a vibração seja processada adequadamente para que as suas características sejam identificadas.

### 4.7.1 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier<sup>13</sup> possibilita a resposta em frequência e mostra as frequências em que a energia vibratórias e concentra. A Figura 24 a mostra um registro no tempo de uma medição realizada em um rotor vertical. O sinal tem características de difícil interpretação. O espectro em frequência mostrado na Figura 24 b, entretanto, apresenta uma clara predominância de uma determinada frequência em relação às demais. Isto pode ser utilizado para identificar a causa da vibração, por exemplo: a velocidade de rotação do rotor é igual à frequência predominante (WEG, 2012) , (Confiabilidade - Manutenção Preditiva) (Teknikao, 2012).

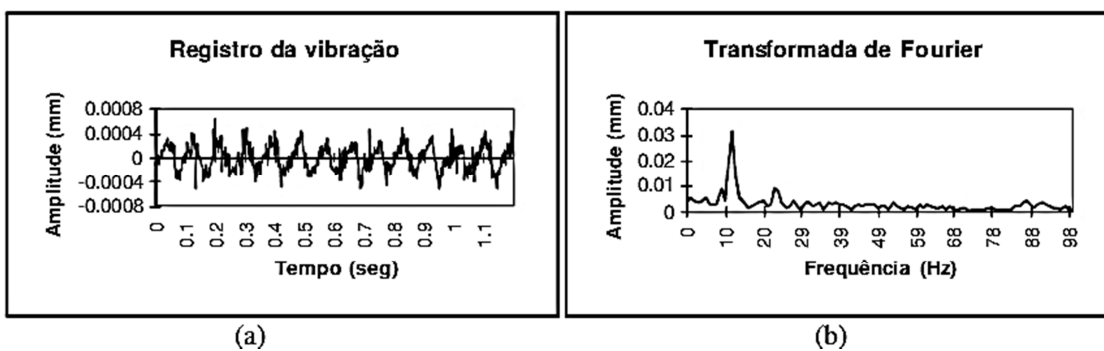


Figura 24 - Aplicação em um sinal da Transformada de Fourier) (Teknikao, 2012).

Segundo Jean Baptiste Joseph Fourier qualquer função complexa, periódica ou não periódica, pode ser decomposta numa série de componentes harmônicas de diferentes frequências. Esta técnica baseia-se nas conhecidas Transformadas de Fourier:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad \text{Equação 4.14}$$

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{j2\pi ft} df \quad \text{Equação 4.15}$$

As Transformadas de Fourier assumem no processamento digital de sinal a seguinte forma:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j2\pi ft} dt \Rightarrow G_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} g_i e^{-j\frac{2\pi ik}{N}} \quad \text{Equação 4.16}$$

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{j2\pi ft} df \Rightarrow g_i = \sum_{k=0}^{N-1} G_k e^{j\frac{2\pi ik}{N}} \quad \text{Equação 4.17}$$

<sup>13</sup> Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) foi um famoso matemático francês que provou que uma função periódica  $g(t)$  qualquer, de período  $T$ , pode ser representada como uma soma de funções senoidais e cossenoidais, cada uma com amplitude, frequência e fase apropriada, daí o nome em sua homenagem.

### 4.7.2 Transformadas Discretas de Fourier

DFT Direta	DFT Inversa
Tempo $\Rightarrow$ Frequência	Frequência $\Rightarrow$ Tempo
$G_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} g_i e^{-j\frac{2\pi i k}{N}}$	$g_i = \sum_{k=0}^{N-1} G_k e^{j\frac{2\pi i k}{N}}$

Tabela 2 - Transformadas Discretas de Fourier

É a DFT que permite o cálculo do espectro de frequência a partir do sinal no tempo:

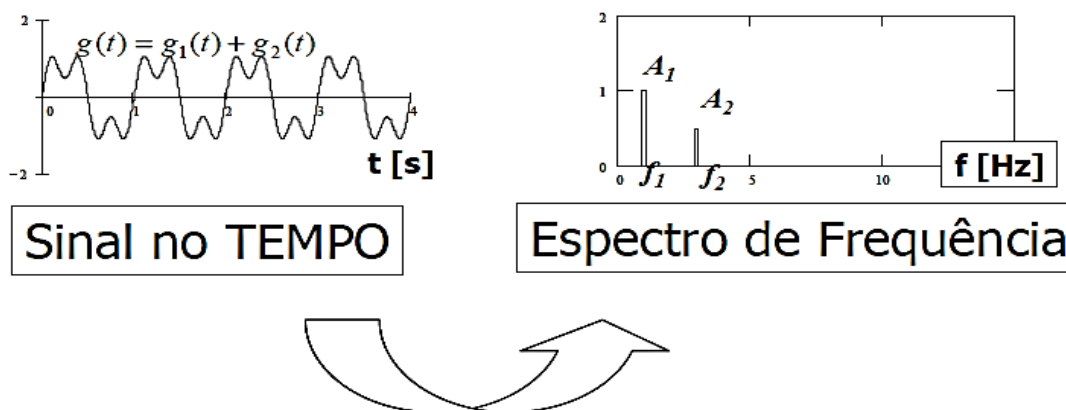


Figura 25 - Passagem do sinal no tempo para um espectro de frequência.

Ou a reconstituição do sinal no tempo a partir do espectro:

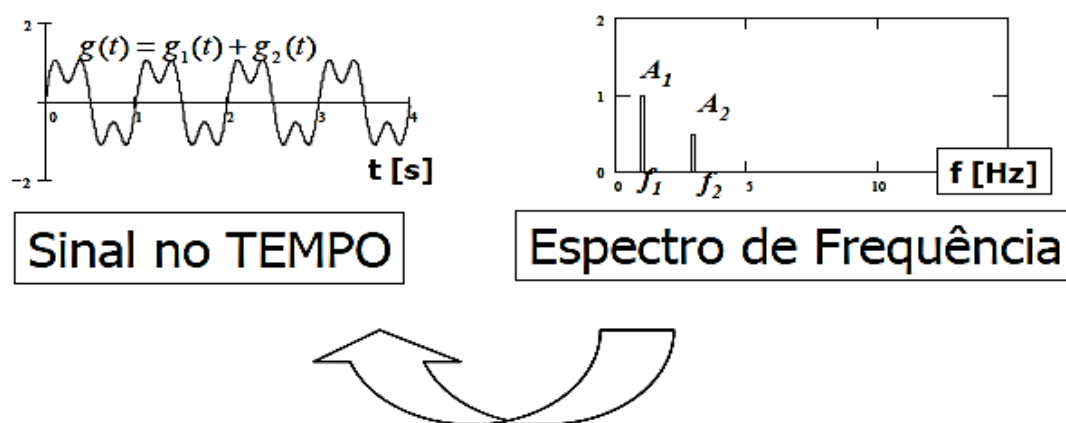


Figura 26 - Passagem do espectro de frequência para um sinal no tempo.

### 4.7.3 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A transformada rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform (FFT)*, é o nome que se dá à Transformada Discreta de Fourier quando é calculada segundo um algoritmo eficiente e computacional, foi desenvolvido nos anos 60, e que hoje é implementado em todos os analisadores de vibrações.

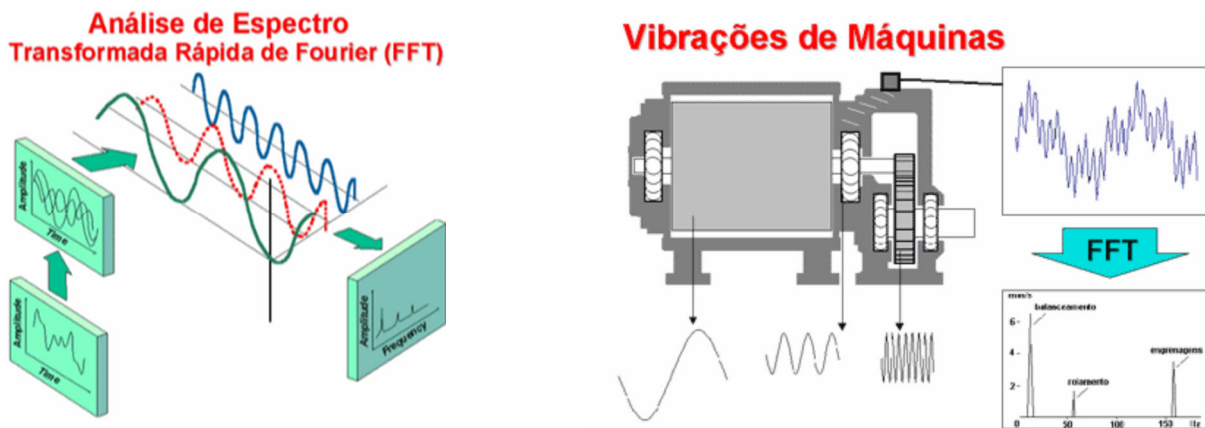


Figura 27 – FFT aplicada a uma máquina (Teknikao, 2012)

## 4.8 Amplitude de Vibração

A amplitude de vibração, é a característica que descreve o nível/intensidade da vibração, é o ponto-chave a ser observado para o diagnóstico da análise da vibração pode ser quantificado de várias maneiras, sendo elas, a relação entre o nível de pico a pico, o nível de pico, o nível médio e o nível RMS<sup>14</sup> de uma onda sinusoidal é mostrado (Sampaio, 2004), (Martins, 2010).

### 4.8.1 Valor Pico a Pico

Este mostra o nível de vibração do topo do pico positivo à base do pico negativo, Refere-se à amplitude total da onda, visando o deslocamento vibratório do equipamento. É aplicado onde este deslocamento vibratório é crítico para uma tensão máxima ou onde a folga mecânica é fator eliminatório, (Martins, 2010)(Sampaio, 2004).

<sup>14</sup> RMS – Root Mean Square

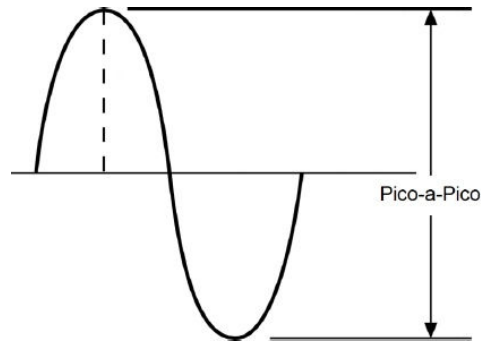


Figura 28 - Medição da amplitude Pico a Pico (Sampaio, 2004)

#### 4.8.2 Valor Pico

Esta quantificação preocupa-se somente com o topo do pico positivo medido em relação à linha de referência. Visa detetar choques de curta duração ou outras peculiaridades no instante da medição, por não levar em consideração o histórico de contribuições de todo o sinal, (Sampaio, 2004).

O valor de pico é particularmente valioso para a indicação do nível de impactos de curta duração. Os valores de pico só indicam o nível máximo que ocorreu, não é tida em conta a evolução temporal da onda (Sampaio, 2004).

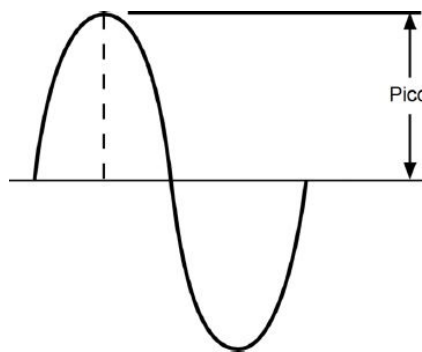


Figura 29 - Medição de amplitude pelo valor de Pico (Sampaio, 2004)

#### 4.8.3 Valor RMS

Valor RMS ou *Root Mean Square* é a medida do nível de vibração mais importante, porque leva em consideração o histórico da onda no tempo e dá um valor de nível o qual é diretamente relacionado à energia contida, e portanto, à capacidade destrutiva da vibração.

É a média quadrática de todas as contribuições do sinal. Isto é, a raiz quadrada do somatório dos quadrados de todos os pontos da curva.

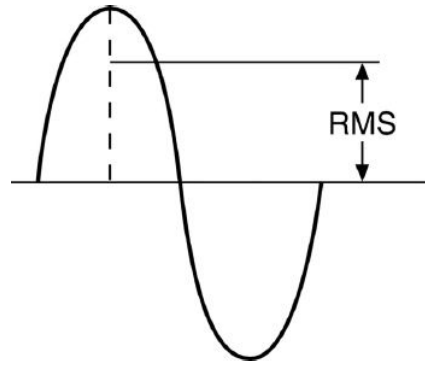


Figura 30 - Medição de amplitude pelo RMS, (Sampaio, 2004)

#### 4.8.4 Relação dos Níveis de Amplitude de Vibração

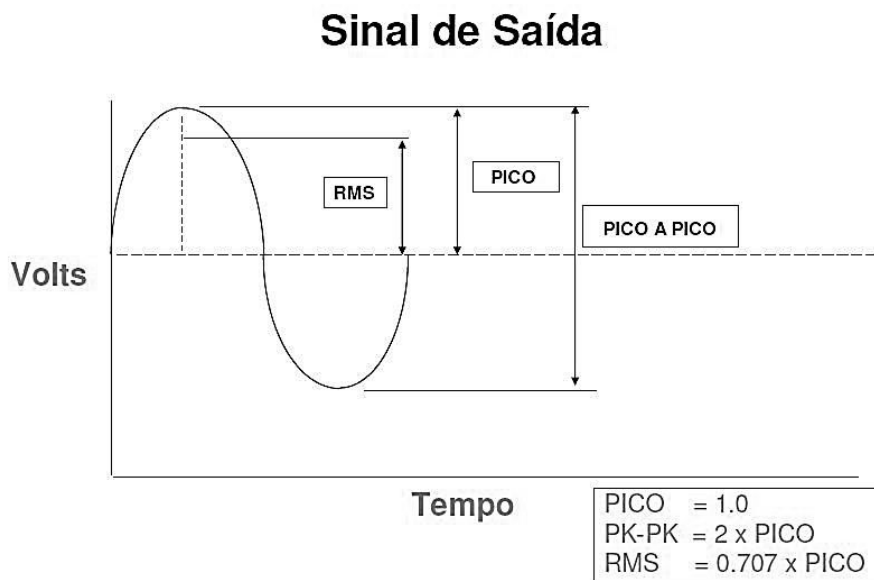


Figura 31 - Relação dos níveis de amplitude de vibração (Sampaio, 2004).

Existe ainda o nível de valor médio e representa a média dos valores medidos em um intervalo de tempo. Possui relação com a história do sinal, porém não se relaciona com nenhuma grandeza física.

## 5 Causas da Vibração Mecânica

É necessário que um profissional da manutenção consiga distinguir entre a vibração normal e a vibração que requer uma resposta imediata para reparar ou substituir um equipamento com problemas.

### 5.1 Desbalanceamento

O desbalanceamento é uma das causas mais comuns de vibração em máquinas, ocorre quando o centro de massa é diferente do centro de rotação. É o deslocar do centro de massa nos corpos rotativos.

Assume uma vibração bem determinada com componente predominante na direção radial<sup>15</sup>, cuja frequência de vibração coincide com a frequência de rotação do eixo, ou seja 1xRPM (Uninove, 2008) (Confiabilidade - Manutenção Preditiva) (Piccoli, s/d).

Existem máquinas de rotor vertical que ao existir desbalanceamento no rotor devido a reações por impulsos, podem apresentar grandes amplitudes axiais (turbinas hidráulicas, compressores rotativos, por exemplo), assim sendo não se pode eliminar o desbalanceamento como uma possível causa de vibração quando ocorre vibração axial<sup>16</sup> (1, sd).

Toda a máquina ou equipamento admite um determinado nível de desbalanceamento o problema é quando esse limite é ultrapassado.

---

<sup>15</sup> Direção radial é a direção no sentido transversal do eixo de rotação

<sup>16</sup> Direção axial é a direção no sentido longitudinal do eixo de rotação

### 5.1.1 Causas do desbalanceamento

- Assimetria
- Não-homogeneidade do material
- Excentricidade
- Desbalanceamento dos rolamentos
- Desbalanceamento hidráulico ao aerodinâmico

## 5.2 Desalinhamento

O desalinhamento é quase tão comum como o desbalanceamento, apesar do uso de apoios autocompensados ou acoplamentos flexíveis é muito difícil alinhar dois eixos e seus apoios de forma que não atuem forças que causem vibrações (1, sd).

O desalinhamento pode ser causado por montagem inadequada, dilatação térmica ou por acoplamento defeituoso.

Existem três tipos básicos de desalinhamento: paralelo, angular e combinado (1, sd).

Assume uma vibração axial de alto nível, as componentes predominam em  $2xRPM$ , e podem estar acompanhadas em simultâneo por ocorrências de ordem  $1xRPM$  e  $3xRPM$  (Confiabilidade - Manutenção Preditiva) (Piccoli, s/d).

### 5.2.1 Desalinhamento Angular

O desalinhamento angular, ilustrado na Figura 32 submete os eixos a uma vibração axial na ordem de  $1xRPM$  (1, sd).

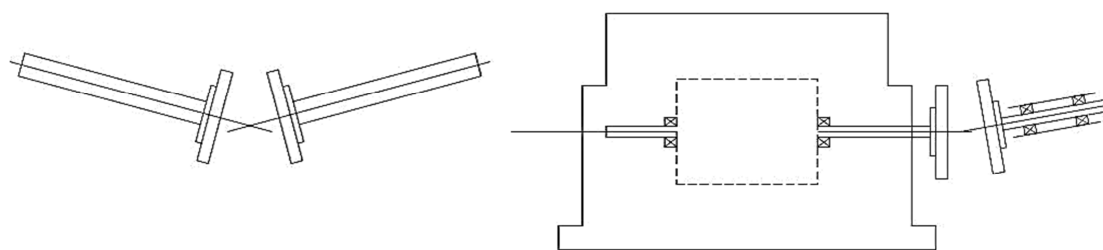


Figura 32 - Desalinhamento angular (Piccoli, s/d).

### 5.2.2 Desalinhamento Paralelo

O desalinhamento paralelo, ilustrado na Figura 33, produz uma vibração radial em uma frequência de  $2X$  RPM (1, sd) (Vittorino, 2008)

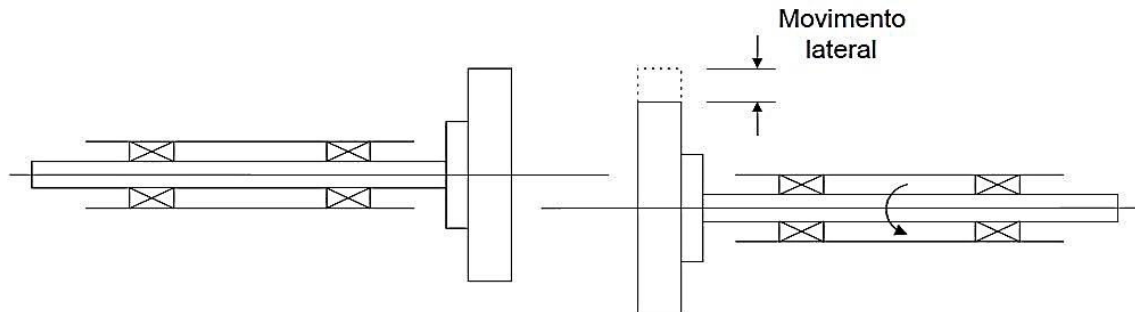


Figura 33 - Desalinhamento Paralelo (Piccoli, s/d)

### 5.2.3 Desalinhamento Combinado

O Desalinhamento Combinado, além da vibração predominante acontecer na direção axial em  $1X$  RPM, ocorre uma vibração significativa em  $2X$  RPM nesta direção (1, sd) (Vittorino, 2008) (Piccoli, s/d).

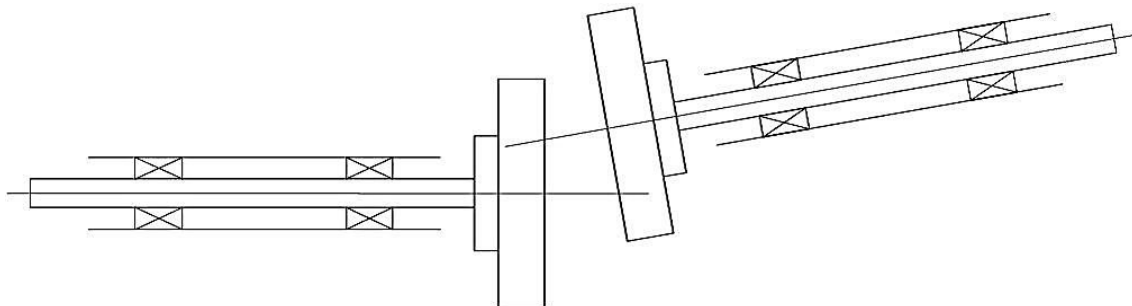
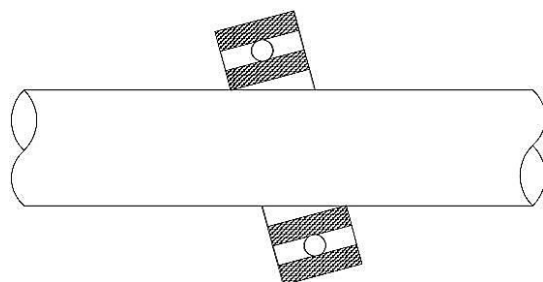


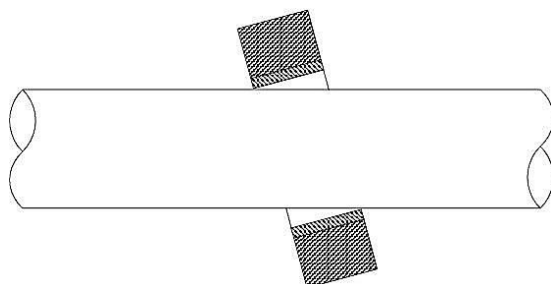
Figura 34 - Desalinhamento Combinado (Piccoli, s/d)

### 5.2.4 Desalinhamento por Apoio de Rolamento

O desalinhamento não surge apenas com acoplamento, por exemplo um apoio de rolamento pode estar desalinhado como mostra a Figura 35, causando uma significativa vibração axial. Este problema deve ser corrigido com a montagem correta do apoio (1, sd) (Vittorino, 2008) (Piccoli, s/d).



*Figura 35 - Apoio de Rolamento*



*Figura 36 - Apoio de Deslizamento*

Um apoio de deslizamento quando instalado com a disposição da Figura 36, também pode apresentar desalinhamento. Neste caso não ocorrem vibrações significativas, a não ser que também exista desbalanceamento. O desbalanceamento provoca grande vibração radial que, por sua vez, com a desorientação do apoio produz componentes axiais significativas (1, sd) (Piccoli, s/d).

### **5.2.5 Desalinhamento de Correias**

Outra causa que produz altos níveis de vibração axial é o desalinhamento de polias <sup>17</sup> (ou sistema coroa-pinhão) em transmissão por correias ou correntes. Procuo ilustrar a problemática através Figura 37 Com funcionamento nestas condições, além de resultarem vibrações destrutivas também são provocados desgastes acelerados de polias, coroas, correias e correntes (1, sd) (Piccoli, s/d).

---

<sup>17</sup> Roda que gira em torno de um eixo e que tem na sua periferia uma ranhura ou cavidade, dentro da qual trabalha uma correia de tração.

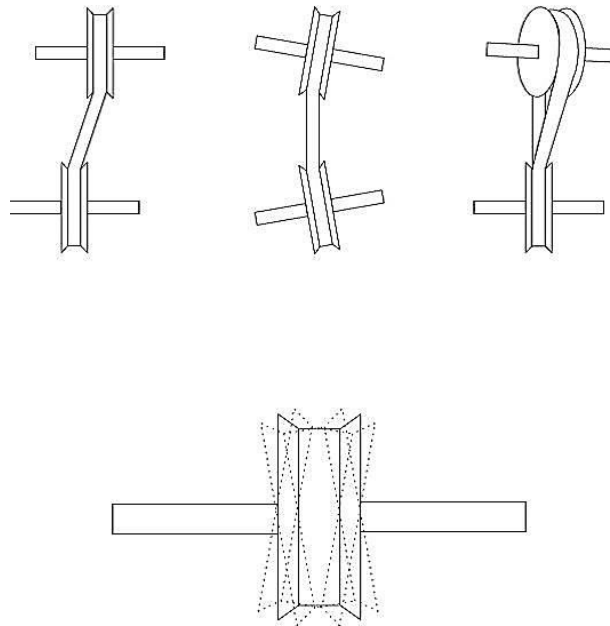


Figura 37 - Desalinhamento de Polias

### 5.3 Excentricidade

A excentricidade é outra causa comum de vibrações em máquinas rotativas. O significado de excentricidade aqui é diferente do desbalanceamento. Aqui o centro de rotação difere do centro geométrico, mesmo com a peça balanceada. A Figura 38 ilustra alguns tipos comuns de excentricidade (1, sd) (Piccoli, s/d).

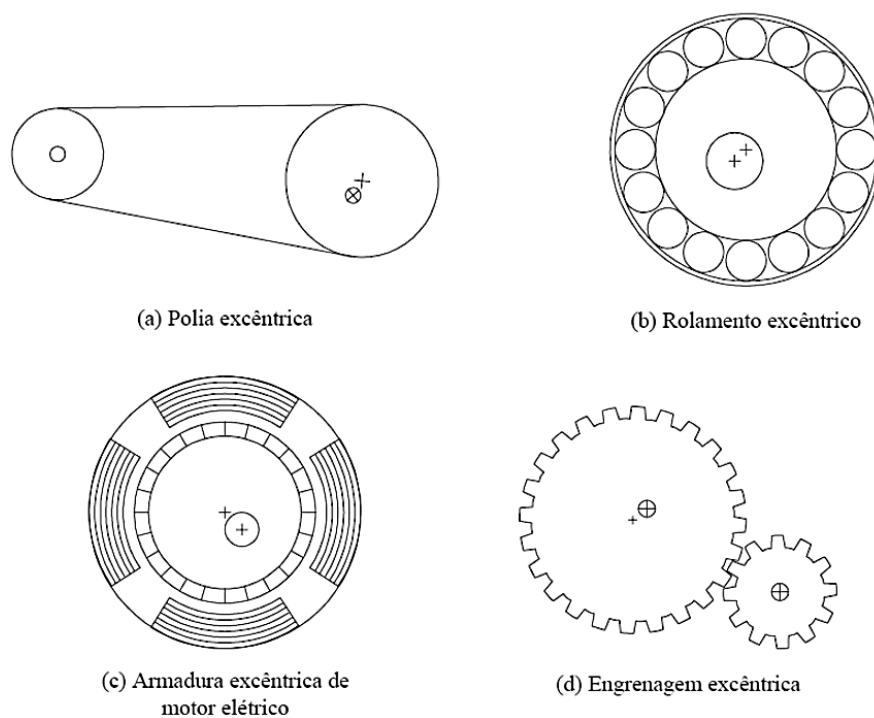


Figura 38 - Tipos de excentricidade. (Piccoli, s/d)

Os sintomas da excentricidade são idênticos aos do desbalanceamento. Em alguns casos a excentricidade pode ser reduzida através de balanceamento mas, em geral, os resultados não são bons. Normalmente o problema só é corrigido através da montagem correta dos elementos envolvidos (1, sd) (Piccoli, s/d).

A excentricidade pode produzir forças de reação de natureza não centrífuga. Na correia com disposição em V, como mostra a Figura 38 (a) a excentricidade provoca variação nas direções das tensões na correia. Neste caso, a maior amplitude de vibração ocorre na direção parte em tensão da correia com frequência igual a  $1xRPM$  da polia excêntrica. Na Figura 38 (c) a excentricidade varia com a interação magnética entre a armadura e os pólos do motor elétrico, criando uma vibração na frequência  $1xRPM$  entre armadura e estator (1, sd). O aumento da carga pode resultar em um aumento da amplitude de vibração. Nas engrenagens excêntricas da Figura 38 (d) a maior amplitude de vibração ocorre na direção da linha de centros das engrenagens na frequência  $1xRPM$  da engrenagem excêntrica (1, sd). Em todos os casos os sintomas são os mesmos do desbalanceamento. Uma forma de diferenciar desbalanceamento de excentricidade neste tipo de motor é medir a amplitude de vibração do motor quando em funcionamento normal. A seguir desliga-se o mesmo e observa-se a mudança da amplitude de vibração: se a amplitude decresce gradualmente o problema deve ser desbalanceamento; se a amplitude desaparece imediatamente, o problema é causado pela armadura excêntrica (1, sd).

## **5.4 Problemas em Apoios de Deslizamento**

Os altos níveis vibratórios devidos a problemas em apoios de deslizamento são resultado, geralmente, de folgas excessivas (desgaste ou erosão química), partes soltas, ou problemas de lubrificação (Piccoli, s/d).

### **5.4.1 Folga Excessiva**

A folga excessiva provoca desbalanceamento, desalinhamento, abrandamento e pancadas (Piccoli, s/d).

### 5.4.2 Processo com Lubrificação (*OIL WHIRL*<sup>18</sup>)

A precessão<sup>19</sup> com lubrificação ocorre apenas em apoios de deslizamento lubrificados sob pressão e quando operam a altas velocidades, normalmente superiores à segunda velocidade crítica do rotor (Piccoli, s/d).

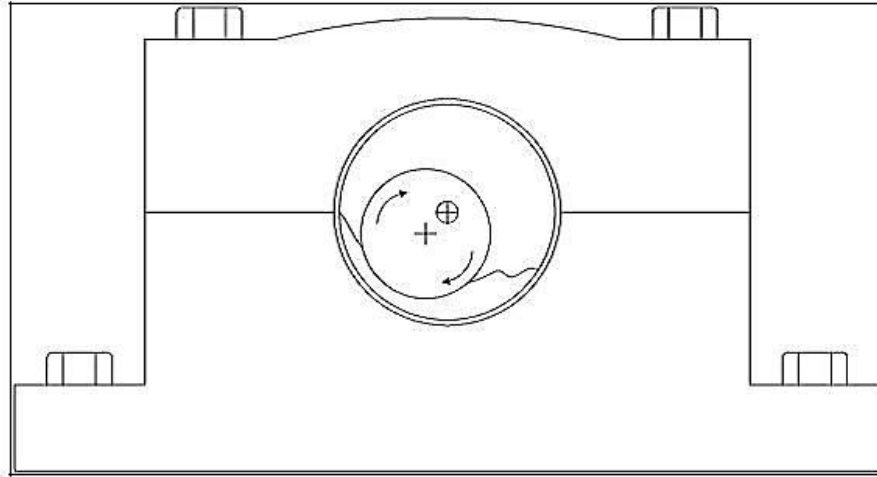


Figura 39 - Apoio com precessão e com lubrificação (*oil whirl*), (Piccoli, s/d).

O mecanismo da precessão é ilustrado na Figura 39 sob condições normais de operação, o eixo se elevará ligeiramente pela lateral do apoio. Esta elevação depende da velocidade de rotação, peso de rotor e pressão do óleo. O eixo, desta forma, opera numa posição excêntrica em relação ao centro do apoio e arrasta o óleo formando uma espécie de “cunha líquida” com pressão do outro lado. Se esta excentricidade é momentaneamente aumentada devido, *e.g.*, a uma onda repentina, uma carga de impacto externa, ou outra condição transitória, uma quantidade adicional de óleo é imediatamente bombeada no espaço deixado vago pelo eixo. O resultado é um aumento na pressão do filme de óleo em contacto com o eixo. A força adicional desenvolvida pode produzir um movimento circular do eixo no interior do apoio. Se o amortecimento do sistema for suficientemente grande o eixo retorna à sua posição de equilíbrio no apoio, se o amortecimento for baixo, o eixo continua com este movimento de precessão (*whirl*). A vibração resultante é frequentemente muito severa, mas facilmente reconhecida por sua frequência incomum. Esta frequência é menor que a metade

<sup>18</sup> “Redemoinho de óleo”

<sup>19</sup> A *Precessão* é o fenómeno físico que consiste na mudança do eixo de rotação de um objecto.

da velocidade de rotação do eixo (geralmente 46% a 48%). A Figura 40 apresenta uma análise de uma máquina com sintomas de *oil whirl* (Piccoli, s/d).

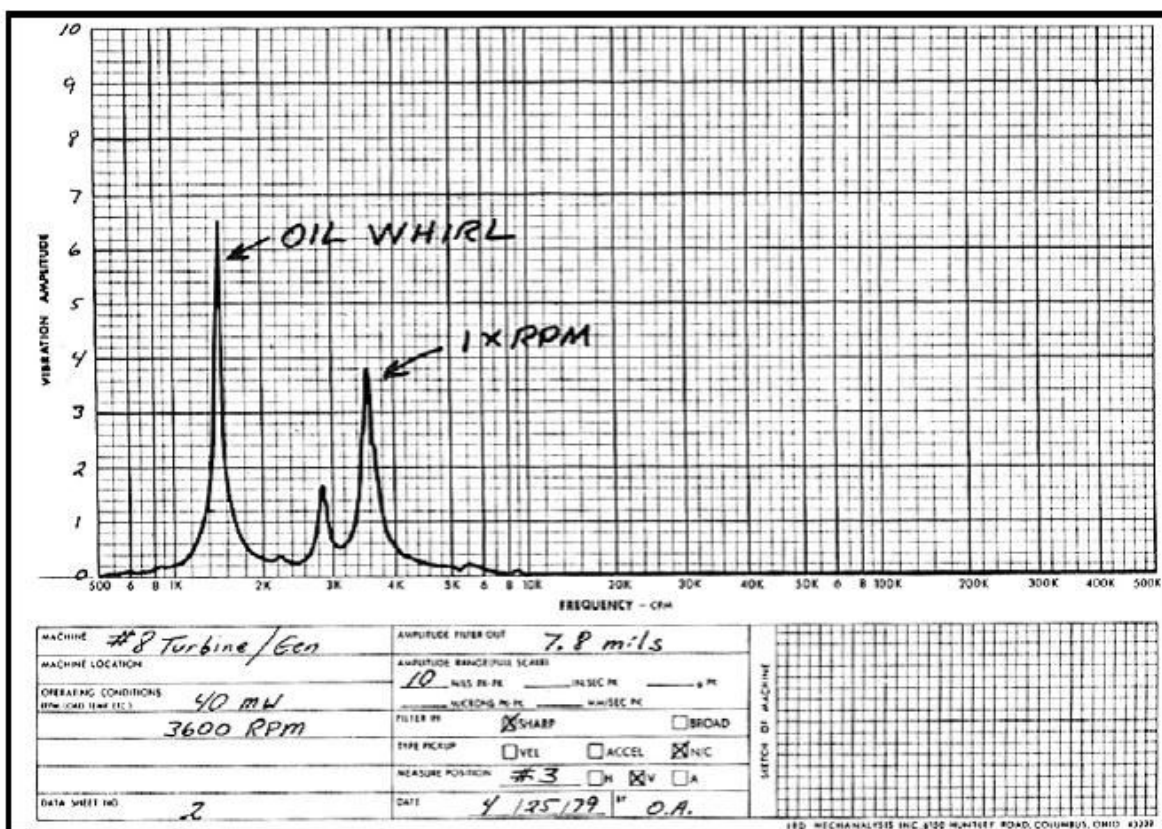
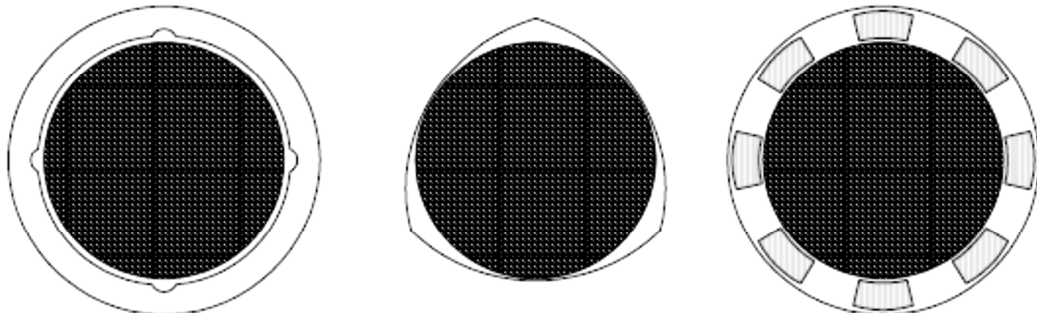


Figura 40 - Análise de uma máquina com sintomas de *oil whirl* (Piccoli, s/d).

Como a frequência dominante é menor que metade da velocidade de rotação (ou da frequência síncrona), se o eixo for observado com uma luz estroboscópica<sup>20</sup> a marca não aparecerá fixa e sim rodando. Entretanto, algumas outras causas possíveis incluem desgaste excessivo do apoio, aumento na pressão ou mudança na viscosidade do óleo. Algumas correções temporárias podem ser feitas mudando a temperatura do óleo lubrificante (mudando a sua viscosidade), introduzindo um pequeno desbalanceamento ou desalinhamento para aumentar a carga, fragmentar, introduzir ranhuras nas faces da superfície do apoio para desfazer a onda de óleo. Naturalmente a solução permanente é substituir o apoio adequadamente projetado para as condições de operação da máquina ou um especialmente projetado para reduzir as possibilidades de *oil whirl* (Piccoli, s/d).

<sup>20</sup> Luz que pisca.

A Figura 41 mostra três configurações de apoios de deslizamento disponíveis especialmente construídos para reduzir as possibilidades de *oil whirl* (Piccoli, s/d).



(a) Apoio ranhurado axialmente    (b) “apoio lobado”    (c) apoio segmentado

Figura 41- Apoios projetados para reduzir a possibilidade de *whirl* (Piccoli, s/d).

**a) Apoio com ranhuras axiais** (Figura 41 (a)) - Neste tipo de apoio, as ranhuras são utilizadas para aumentar a resistência ao *whirl* em três pontos igualmente espaçados. Esta configuração é normalmente limitada a menores aplicações tais como pequenas turbinas a gás (Piccoli, s/d).

**b) “Apoio lobado”** (Figura 41 (b)) - Este tipo de apoio produz estabilidade contra o *oil whirl* usando três “filmes” de óleo sujeito a pressão de forma que o eixo permanece centralizado. Algumas vezes possuem ranhuras axiais para aumentar a resistência ao *whirl* (Piccoli, s/d).

**c) Apoios segmentados** (Figura 41 (c)) - É uma escolha comum (muito utilizado) em máquinas industriais grandes, de alta velocidade. Cada segmento desenvolve uma cunha de óleo sujeito a pressão que tende a centralizar o eixo no apoio (Piccoli, s/d).

Uma máquina que é normalmente estável pode exibir sinais de vibração por *oil whirl* e, algumas vezes, esta condição ocorre intermitentemente. Neste caso, o problema não está relacionado com o apoio de deslizamento mas com forças externas que, confidentemente, estão na mesma frequência do *oil whirl* do apoio. Existem duas fontes comuns de vibração que podem excitar *oil whirl* num apoio de deslizamento: vibração transmitida pelo aglomerado que opera na vizinhança e vibração proveniente de outros elementos da própria máquina (Piccoli, s/d).

### 5.4.3 Precessão Histerética

Um rotor que opera acima de velocidades críticas tende a se fletir em sentido oposto ao desbalanceamento. O atrito interno, ou histerético<sup>21</sup>, tende a restringir esta deflexão. Quando, entretanto, as forças de amortecimento estão em coincidência de fase com a deflexão, o efeito é contrário, agindo no sentido de aumentar a mesma. É uma vibração similar ao *oil whirl*, ocorrendo numa frequência diferente, normalmente quando o rotor está a operar entre a primeira e segunda velocidade críticas do rotor<sup>22</sup>. Nesta condição a frequência da precessão histerética é igual à primeira frequência natural (primeira velocidade crítica) do rotor (raramente ocorre na mesma frequência do *oil whirl*). Quando o rotor está a operar acima da segunda velocidade crítica os sintomas são iguais ao do *oil whirl*. A precessão histerética, é normalmente controlada pelo amortecimento próprio dos apoios de deslizamento (que é normalmente alto). Quando este problema ocorre, a solução usual é aumentar o amortecimento do apoio ou da estrutura, através, por exemplo, da instalação de apoios segmentados ou outros especialmente projetados. Nalguns casos o problema pode ser solucionado reduzindo o amortecimento do rotor, o que pode ser feito, por exemplo, substituindo um acoplamento por engrenagens por um acoplamento flexível.

### 5.4.4 Lubrificação Inadequada

Segundo Piccoli (s/d), problemas como insuficiência de lubrificação ou uso de lubrificante inadequado, podem causar vibração em apoios de deslizamento. Nestes casos, a lubrificação inadequada causa atrito excessivo entre o apoio estacionário e o eixo rotativo, e o atrito excita uma vibração no apoio ou partes a ele relacionadas (*dry whip*<sup>23</sup>). A frequência da vibração, neste caso, é normalmente muito alta, produzindo ruído agudo, e não tem relação com a velocidade de rotação do rotor. Quando há suspeita sobre a existência de *dry whip* deve-se verificar a lubrificação do apoio e se a folga está correta (tanto folga excessiva como insuficiente pode causar *dry whip*)”.

---

<sup>21</sup> Histerético : “Atrito interno”.

<sup>22</sup> Velocidade crítica do rotor: velocidade que gera elevadas amplitudes de vibração do rotor.

<sup>23</sup> Instabilidade na fricção rotor - estator, podendo causar falha total na máquina.

## 5.5 Elementos Mecânicos Soltos

Elementos soltos produzem vibração numa frequência que é normalmente igual ao dobro ou múltiplos inteiros da velocidade de rotação do eixo rotativo. Normalmente o elemento se solta em virtude de uma vibração excitada por outra fonte, como, por exemplo, desbalanceamento ou desalinhamento. O elemento solto, por sua vez, agrava a situação, transformando vibrações aceitáveis em excessivas (Piccoli, s/d).

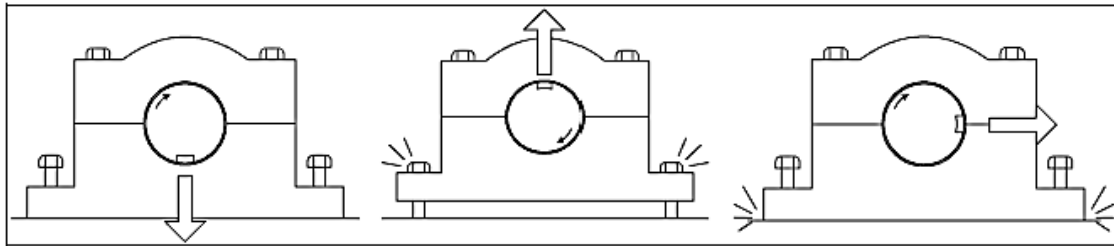


Figura 42 - Elemento Mecânico solto (Piccoli, s/d).

A Figura 42 apresenta um esquema que ilustra como um elemento solto, pode produzir uma vibração numa frequência igual ao dobro da velocidade de rotação do rotor. O desbalanceamento é a origem da vibração neste exemplo. Quando a parte mais pesada do rotor está na parte inferior do apoio a força centrífuga dirige-se para baixo, forçando o apoio contra a sua base. Quando a parte mais pesada do rotor passa pela parte superior do apoio, a força dirige-se para cima e o apoio é elevado da base. Quando a parte mais pesada do rotor está na lateral do apoio o mesmo cai sobre a base. Deste processo resulta que a força actua de duas formas distintas sobre o apoio, durante uma volta do rotor, o rotor é inicialmente levantado e a seguir cai sobre a base. A Figura 43 mostra um registo possível para esta força. Caracteriza-se aqui uma força periódica com comportamento não harmónico o que implica na presença de frequências harmónicas, com predominância da segunda harmónica (igual ao dobro da frequência de operação) (Piccoli, s/d).

Como resumo, a principal característica da vibração originada por elemento mecânico solto é a predominância da segunda frequência harmónica. Existe, normalmente, alguma folga inerente em toda máquina, de forma que é absolutamente normal encontrar alguma componente referente à segunda harmónica (até mesmo, harmónicas maiores) quando há desbalanceamento e desalinhamento. A suspeita de elemento mecânico solto é justificada quando a segunda harmónica é predominante (Piccoli, s/d).

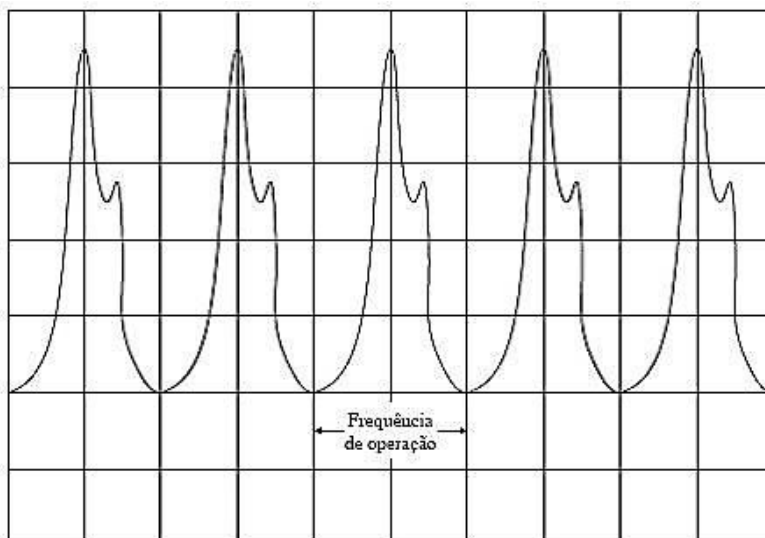


Figura 43 - Força centrífuga com elemento solto (Piccoli, s/d).

## 5.6 Dentes de Engrenagens

Normalmente, as vibrações originadas por problemas em engrenagens são fáceis de ser identificadas por ocorrerem numa frequência alta, igual à frequência de rotação da engrenagem multiplicada pelo seu número de dentes (frequência de engrenamento). “O espectro mostrado na Figura 44 é obtido de medições realizadas no apoio C, junto à caixa de engrenagens (reductor) de um sistema constituído por uma turbina, um reductor e um ventilador. Observa-se um pico considerável (predominante nas direções horizontal e axial) numa frequência de 2240 Hz que é igual ao produto do número de dentes do pinhão (32) pela sua frequência de rotação que é a mesma da turbina (70 Hz). Alguns problemas comuns que apresentam estas características são” (Piccoli, s/d):

- Desgaste excessivo;
- Imperfeições nos dentes;
- Lubrificação deficiente;
- Impurezas incrustadas nos dentes.

Outras fontes de problemas em máquinas (desalinhamentos, eixos empenados) podem também originar vibrações na frequência de engrenamento. As excentricidades, os desbalanceamentos e os eixos empenados também podem causar vibrações em submúltiplos da frequência de engrenamento.

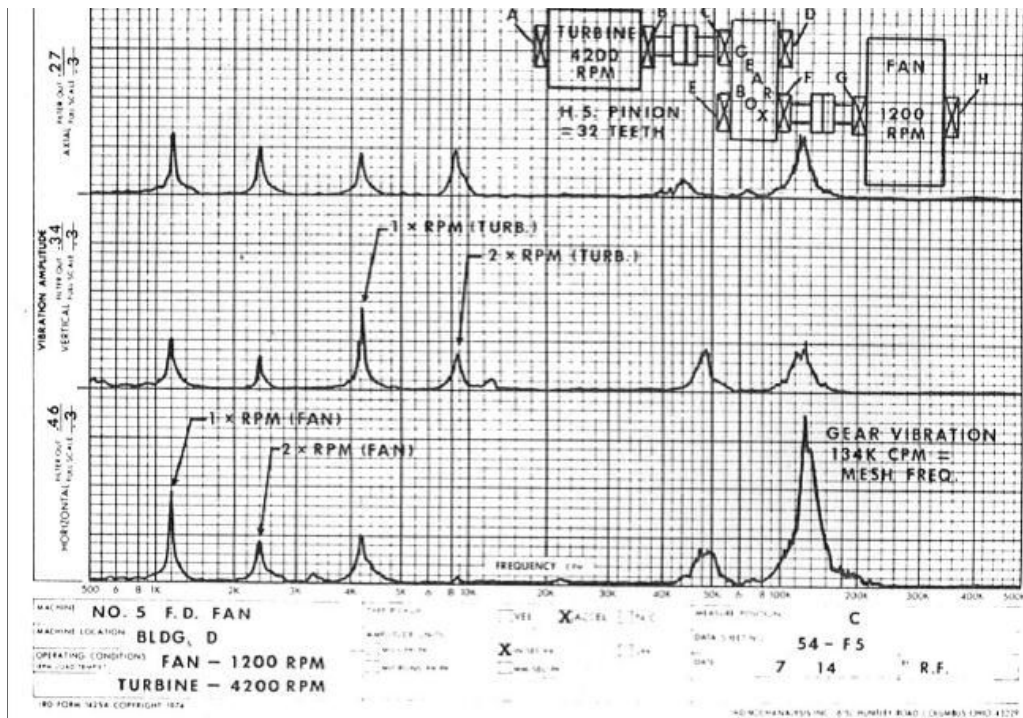


Figura 44 - Espectro de equipamento com problema de engrenagem (Piccoli, s/d).

Segundo (Piccoli, s/d) a Figura 45 mostra dados de medições efetuadas num conjunto motor, redutor e compressor. As amplitudes em alta frequência são predominantes, indicando problemas nas engrenagens (posições C, D, E e F). Deve-se, entretanto, observar que as amplitudes de vibração axial medidas na frequência de rotação do motor (posições A, B, C e D) também apresentam valores elevados. Isto sugere que o desalinhamento, mais que qualquer problema nas engrenagens, seja a causa principal das vibrações. Deve-se, então, corrigir o desalinhamento e se realizar novas medições. São boas as hipóteses de que as amplitudes na frequência de engrenamento desapareçam.

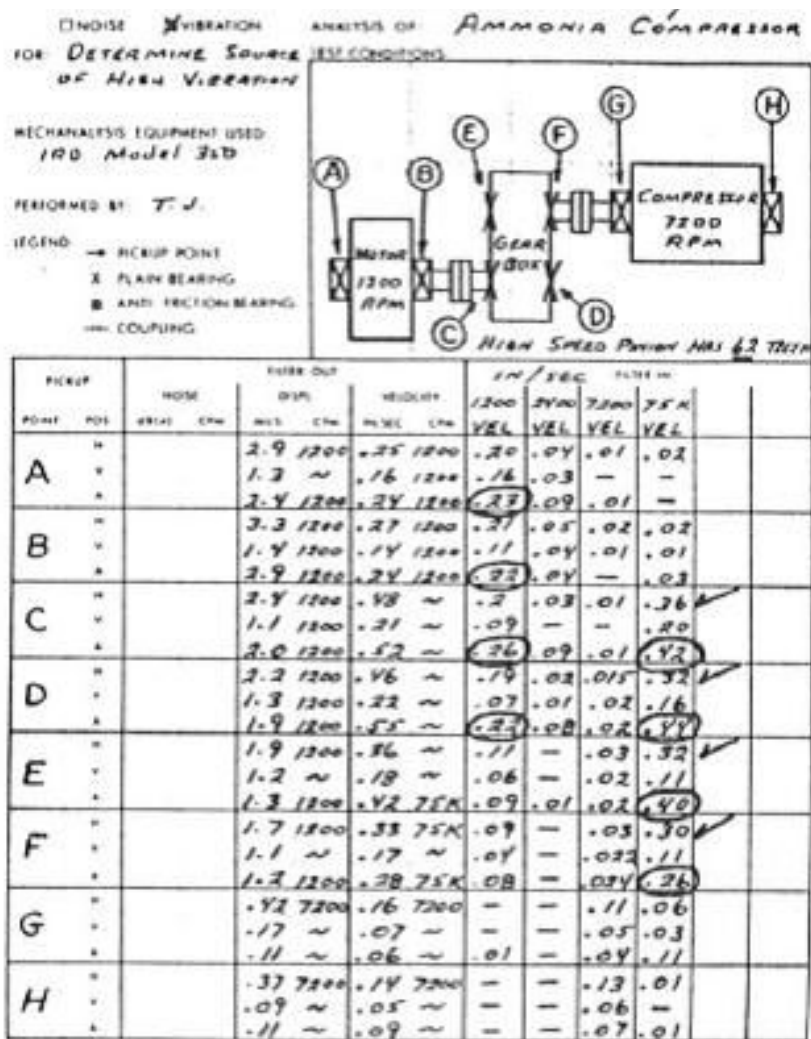


Figura 45 - Problema de desalinhamento que gera vibrações na frequência de engrenamento (Piccoli, s/d)

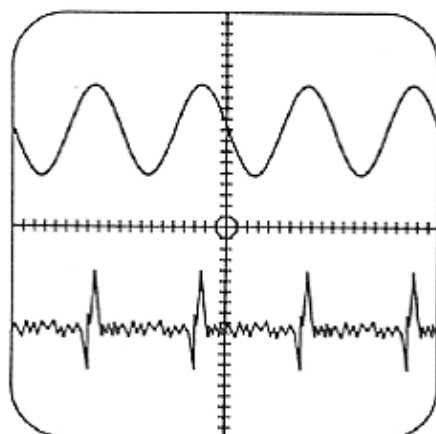


Figura 46 - Diferença entre desbalanceamento e dente de engrenagem avariado (Piccoli, s/d)

Segundo (Piccoli, s/d) as engrenagens também podem gerar vibrações noutras frequências não relacionadas com a frequência de engrenamento. Quando, por exemplo, a engrenagem apresenta apenas um dente avariado ou deformado, pode surgir uma vibração na frequência de rotação. Neste caso o problema pode ser identificado analisando-se a forma da onda vibratória (em um osciloscópio), ocorrem picos elevados em intervalos de um período de rotação como mostra a Figura 46, comparando a vibração resultante com a que seria gerada por um desbalanceamento. Se existirem mais de um dente danificados a frequência será multiplicada pelo número destes.

Quando um “comboio” de engrenagens opera com condição de carga muito leve as vibrações podem apresentar amplitudes e frequências erráticas. Esta condição de operação pode ocasionar impactos entre as diversas engrenagens de forma desordenada. Os impactos excitam as frequências naturais das engrenagens, apoios e componentes a eles ligados. Este tipo de problema pode ser distinguido de um problema em um apoio, por exemplo, observando-se que as amplitudes originadas pelo problema do apoio são muito maiores próximas ao próprio apoio, enquanto as originadas por engrenagens são detetadas em dois ou mais pontos da máquina (Piccoli, s/d)

As engrenagens também podem apresentar problemas comuns a outras partes da máquina como desbalanceamento ou montagem excêntrica, por exemplo, apresentando, nestes casos, vibrações com estas características.

Em virtude das vibrações de alta frequência, as engrenagens são uma fonte comum de ruído nas máquinas de forma que a correção dos problemas associados a elas reduz significativamente o nível de ruído existente (Piccoli, s/d).

## **5.7 Apoio de Rolamentos Defeituosos**

Os defeitos em guias, esferas ou roletes em apoios de rolamento causam vibrações de alta frequência. Nestes casos, a frequência não é, necessariamente, um múltiplo inteiro da velocidade de rotação do eixo. Possíveis movimentos de fricção ou deslizamento de esferas ou roletes podem gerar frequências mais diretamente relacionadas com os processos de fricção ou impactos (Piccoli, s/d).

Normalmente as amplitudes de vibração dependem da extensão do problema existente, mas os possíveis impactos podem excitar também frequências naturais, o que deve ser

adequadamente verificado. As altas frequências naturais, normalmente excitadas nestes casos, estão associadas a componentes estruturais da máquina, e ocorrem, tipicamente, acima de 166 Hz. Nalguns casos, podem ser geradas vibrações em frequências naturais associadas à geometria dos apoios (Piccoli, s/d)

A Figura 47 mostra o resultado de uma análise realizada numa máquina com apoios de rolamentos defeituosos. São observadas várias vibrações em altas frequências (faixa acima de 333 Hz, com a máquina a operar em 30 Hz). Estas vibrações são resultado da excitação de frequências naturais do apoio ou outras partes estruturais associadas. Um outro detalhe é que, normalmente, as vibrações nos apoios não são transmitidas a outros pontos da máquina, de forma que os sinais estarão presentes apenas em medições realizadas próximas ao apoio defeituoso (Piccoli, s/d).

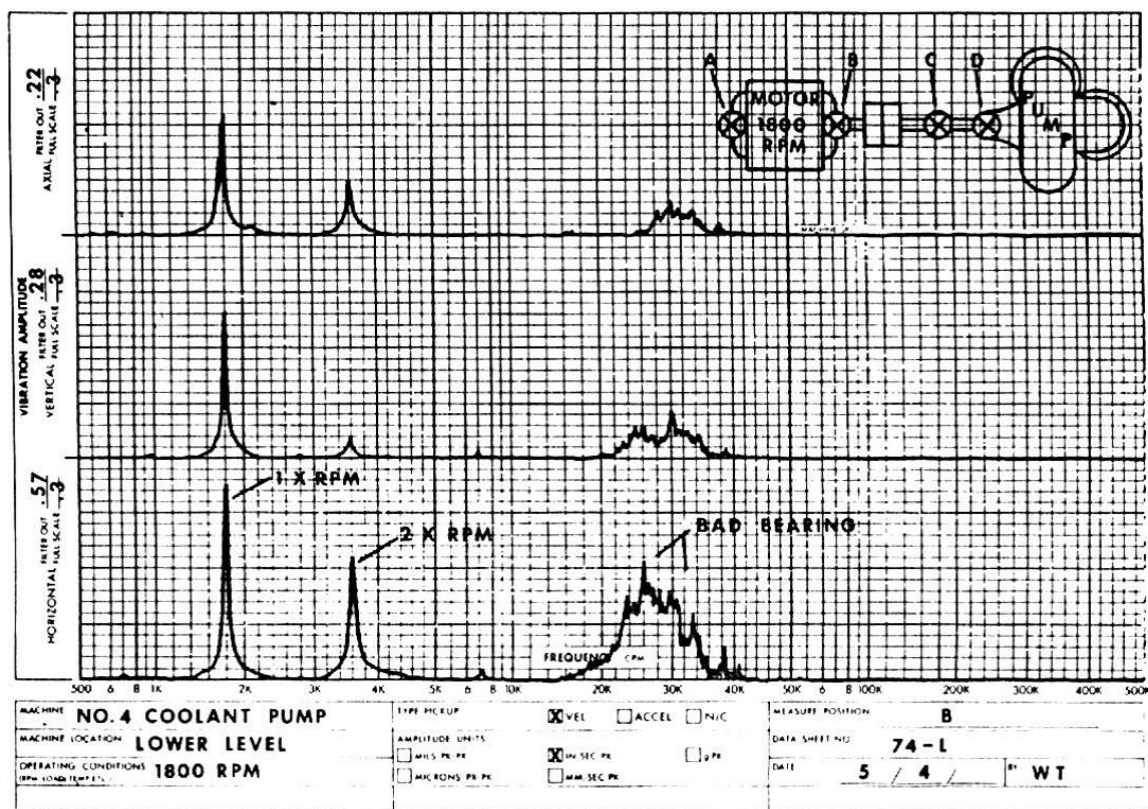


Figura 47 - Máquina com apoios de rolamentos defeituosos (Piccoli, s/d).

### 5.7.1 Outras Causas de Falhas em Apoios de Rolamentos

Os rolamentos estão entre os elementos disponíveis para máquinas que mais cuidados exigem na construção. Apoios de rolamento normalmente não falham, a não ser que forças geradas

por outros problemas sejam responsáveis pela falha. Frequentemente estas forças também são responsáveis pelas vibrações. Desta maneira, mesmo quando a análise da vibração apresenta sintomas de que existem problemas nos apoios, não se deve eliminar a possibilidade de que a causa primária da vibração seja outra. A Tabela 3 apresenta as principais causas de falhas em apoios de rolamento, Figura 48

Carga Excessiva
Desalinhamento
Alojamentos de Eixos Defeituosos
Montagem Defeituosa
Ajuste Impróprio
Lubrificação Imprópria ou Inadequada
Selagem Pobre
Endurecimento Irregular
Corrente Elétrica

Tabela 3 - Causas comuns de falhas em rolamentos (Piccoli, s/d).

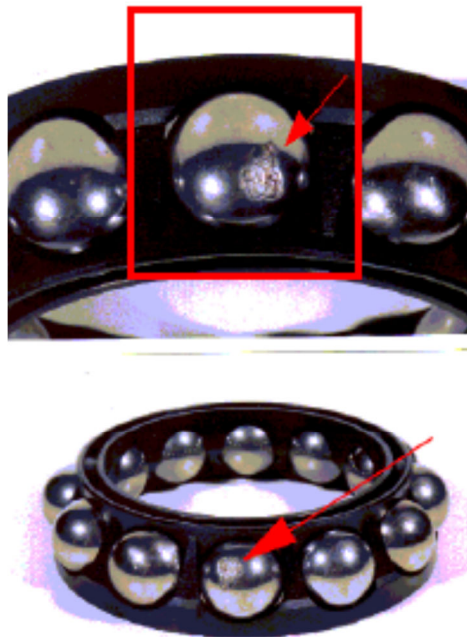


Figura 48 - Falha em esfera de rolamento (Bonadiman, s/d).

## 5.8 Problemas Elétricos

As vibrações causadas por falhas elétricas ocorrem em sistemas que possuem máquinas elétricas (motores, geradores, alternadores, etc.) e são causadas normalmente por forças magnéticas desequilibradas atuantes em rotores ou estatores. Algumas causas comuns destas forças são:

- Rotor não redondo;
- Armaduras excêntricas;
- Rotor e estator desalinhados;
- Estator elíptico;
- Circuito aberto ou curto-circuito;
- Problemas no enrolamento do rotor.

Os problemas elétricos geralmente apresentam vibrações na frequência de rotação ou 1,2 x frequência nominal da rede (em Portugal 50Hz), o que torna difícil a distinção de outras fontes como desbalanceamento. Uma maneira de se verificar se a vibração é causada por um problema elétrico é desligar a máquina durante a medição da amplitude de vibração e verificar se a mesma desaparece ou diminui significativamente e rapidamente. Em caso positivo a causa é certamente elétrica. Se a diminuição da amplitude for lenta e acompanhar a queda na frequência de rotação, então a causa é de natureza mecânica. Uma outra característica deste tipo de problema é que os níveis vibratórios dependem da carga. Muitas vezes, motores elétricos são testados em vazio e não apresentam amplitudes de vibração elevadas e quando em operação com carga vibram violentamente, evidenciando problemas elétricos (Piccoli, s/d).

Em motores de indução podem ocorrer vibrações na frequência de deslizamento que é igual à diferença entre a frequência de rotação do rotor e a frequência elétrica (do campo magnético rotativo) chamada de síncrona que é sempre igual à frequência da linha de corrente alternada (frequência da rede, 50 Hz). Neste caso a amplitude da vibração é por impulsos. O fenômeno do batimento é intensificado quando ocorre um problema mecânico associado (como o desbalanceamento) e a pulsação da amplitude fica estável, especialmente quando as duas frequências são relativamente próximas (Piccoli, s/d).

Os motores elétricos também podem apresentar vibrações devido a impulsos de binários gerados quando o campo magnético do motor magnetiza os polos do estator. A frequência associada é igual ao dobro da frequência da rede. Os impulsos de binário são raramente problemáticos exceto quando são exigidos níveis de vibração extremamente baixos ou os impulsos excitam ressonâncias em outras partes da máquina (Piccoli, s/d).

## **5.9 Vibrações Devido a Forças Aerodinâmicas e Hidráulicas.**

Máquinas que operam com fluidos como ar, água, óleo ou gases podem apresentar vibrações originadas pela interação entre elementos sólidos móveis (pás) e fluidos. Isto acontece frequentemente em bombas, ventoinhas e similares.

“As vibrações geradas ocorrem em frequências altas (número de pás vezes a frequência de rotação). As causas da vibração são forças hidráulicas que normalmente são pequenas mas se tornam importantes quando excitam alguma ressonância na máquina. A Figura 49 mostra o resultado de uma medição efetuada numa bomba rodando em 360 Hz com um propulsor de seis pás rodando a 3600 rpm (60 Hz)” (Piccoli, s/d).

Se não ocorre ressonância o problema pode ser originado por cavitação<sup>24</sup>, recirculação ou turbulência. A cavitação ocorre quando uma bomba opera com excesso de capacidade ou baixa pressão de sucção. Como o fluido que já entrou não preenche completamente o espaço, o fluido que está a entrar é puxado aos pulos para preencher os espaços vazios. Isto cria bolsas de vácuo que são altamente instáveis que podem literalmente implodir muito rapidamente. Os impactos gerados excitam frequências naturais localizadas em partes da bomba, como as implosões podem ocorrer em tempos e posições aleatórios na bomba ou na tubulação a amplitude e a frequência da vibração também são aleatórias (Piccoli, s/d)

“A recirculação pode ocorrer quando uma bomba está a operar em baixa capacidade ou alta pressão de sucção. Na tentativa de se mover uma quantidade excessiva de fluido da bomba, uma porção do fluido retorna. Este fluxo reverso e a consequente mistura de fluido movendo-se em direções opostas causa vibração. A recirculação ocorre algumas vezes dentro de uma bomba de múltiplos estágios com folga excessiva entre o rotor e seu alojamento. Esta forma de recirculação pode mostrar uma frequência quase constante não relacionada com a

---

<sup>24</sup> Cavitação: formação de cavidades dentro da massa líquida.

frequência de rotação. Em qualquer situação, as vibrações devidas a recirculação apresenta flutuações aleatórias na frequência e na amplitude similares às causadas pela cavitação” (Piccoli, s/d).

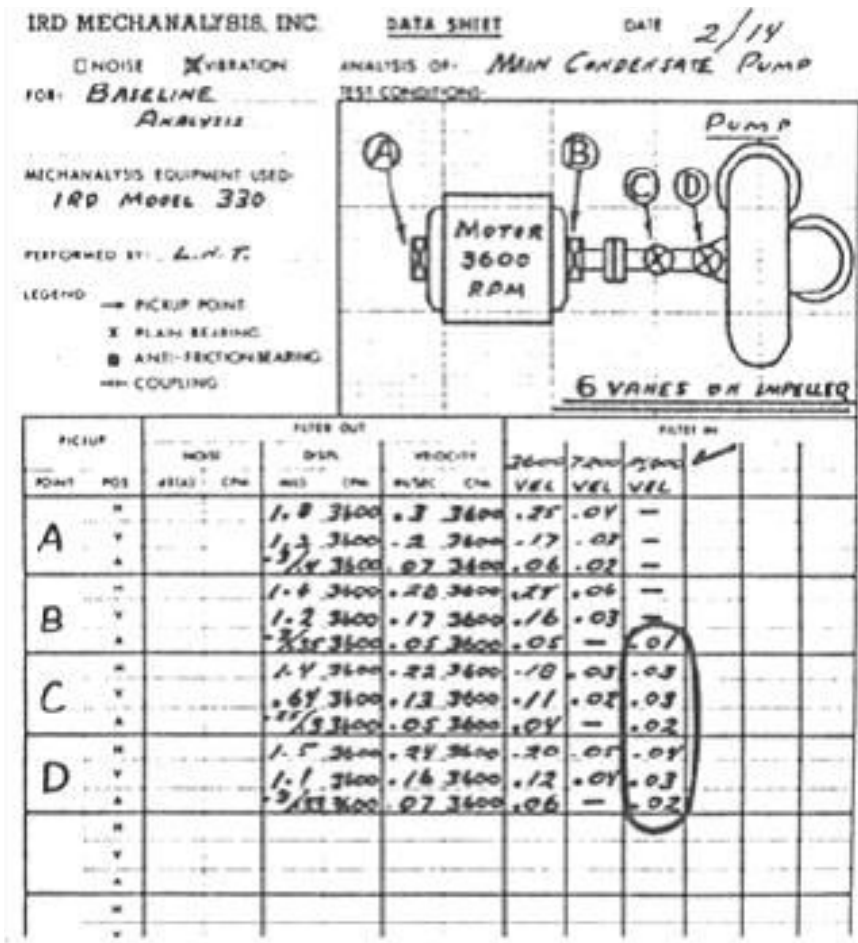


Figura 49 - Medição de vibração causada por forças hidráulicas (Piccoli, s/d).

“O fluxo turbulento é o resultado da resistência ao fluxo normal de fluidos. Esta resistência pode ser causada por obstruções, curvas agudas ou apenas atrito superficial entre fluido e tubulação. A turbulência também pode ser causada pela mistura de fluidos de alta e baixa velocidades. Um exemplo é um motor a jacto quando os gases de exaustão de alta velocidade se misturam ao ar externo quase estacionário. Embora os níveis de ruído gerado por fluxo turbulento sejam muito altos, a máquina vibra pouco pois a condição de turbulência é externa a ela” (Piccoli, s/d).

A vibração e o ruído associados com cavitação, recirculação e fluxo turbulento apresentam características similares. Este tipo de vibração é normalmente de natureza aleatória com amplitudes e frequências instáveis.

A Figura 50 mostra um espectro de uma vibração gerada por cavitação. Pode-se observar uma vibração de regime permanente em 3600 rpm (60 Hz), indicando, possivelmente, um pequeno desbalanceamento ou desalinhamento no motor. Existe, entretanto, uma vibração aleatória (banda larga) entre 500 Hz e 1667 Hz indicando problemas de associação com fluxo hidráulico e aerodinâmico (Piccoli, s/d).

## 5.10 Vibrações Devido a Fricções

A fricção como referido em pontos anteriores é o contacto eventual entre partes estacionárias e rotativas de uma máquina podendo gerar vibrações na frequência de rotação, no dobro dela, em seus submúltiplos e altas frequências. A fricção também pode gerar um aumento no nível de amplitudes em toda uma ampla faixa de frequências. Se a fricção for contínuo é provável que não se observe nenhuma vibração característica em especial mas o atrito contínuo pode excitar ressonâncias em altas frequências em outras partes da máquina produzindo medições de amplitudes e fases instáveis (Piccoli, s/d).

“Observou-se que a fricção em selos de uma turbina a vapor apresenta diferentes amplitudes e fase nas mesmas condições de operação em tempos diferentes de observação.

Por exemplo: uma máquina rodando a 3600 rpm apresentava níveis constantes de amplitude e fase; após diminuir a sua velocidade de rotação para 1800 rpm por um curto tempo, e retornando a operar a 3600 rpm, a mesma máquina apresentou amplitude e fase



Figura 50 - Espectro de uma vibração causada por cavitação (Piccoli, s/d)

completamente diferentes das anteriores. Isto sugere que o ponto em que está acontecer fricção está a mover-se quando se varia a velocidade de rotação” (Piccoli, s/d).

A fricção é, normalmente o resultado de um eixo empenado ou partes avariadas ou avariadas que podem ser detetados por procedimentos já descritos.

Causa	Amplitude	Frequência	Fase	Considerações
<b>Desbalanceamento</b>	Proporcional ao desbalanceamento. Maior na direção radial.	1xRPM	Referencia simples. Marca estável e repetitiva.	Causa mais comum de vibrações.
<b>Desalinhamento ou empenamento</b>	Maior na direção axial (50% acima da radial)	1xRPM normal 2xRPM algumas vezes.	Referência simples, dupla ou tripla.	Melhor identificada pela grande amplitude axial.
<b>Apoios Excêntricos</b>	Normalmente não muito grande.	1xRPM	Marca simples	Se em engrenagens, a maior vibração ocorre na linha de centros de engrenagens. Se em motores ou geradores, desaparece quando a potência é desligada. Se em bombas ou ventiladores, tente balancear.
<b>Apoios antifricção em mau estado.</b>	Inconstante – medir velocidade e aceleração.	Muito alta – várias vezes a RPM	Marcas Múltiplas erráticas.	O apoio responsável é o que está mais próximo da maior vibração de alta frequência.
<b>Engrenagens com defeito ou ruído</b>	Baixa – medir velocidade e aceleração	Muito alta – número de dentes danificados xRPM	Errática – marcas múltiplas	Recomenda-se a análise de frequências de ordem alta.
<b>Elementos mecânicos soltos</b>	Errática algumas vezes	2xRPM	Duas marcas levemente erráticas	Normalmente acompanhado de desbalanceamento e/ou desalinhamento.
<b>Correias em mau estado</b>	Errática ou pulsante	1,2,3,4xRPM da correia	Uma ou duas marcas dependendo da frequência. Normalmente inconstante.	Lâmpada estroboscópica é a melhor ferramenta para congelar a correia com problema.
<b>Elétrica</b>	Desaparece quando a potência é desligada.	1xRPM ou 1,2x a frequência	Marcas simples ou duplas rotativas.	Se a vibração desaparece instantaneamente quando a

		síncrona (da rede, aqui 50 Hz).		máquina é desligada a causa é elétrica. Problemas mecânicos e elétricos produzem batimentos.
<b>Forças aerodinâmicas ou hidráulicas.</b>	Pode ser grande na direção axial.	1xRPM ou n° de pás xRPM	Marcas Múltiplas	Rara causa de problema exceto quando ocorre ressonância.
<b>Forças alternativas</b>	Maior em linha com o movimento	1,2 ou mais xRPM	Marcas Múltiplas	Em máquinas alternativas só pode ser reduzida por alteração de projeto ou isolamento

*Tabela 4 – Resumo das causas de vibração e respectivas características.*



## 6 Normas para Avaliação da Vibração de Máquinas Elétricas

São documentos *standard* que contêm especificações técnicas ou outros critérios precisos para serem usados consistentemente como regras, diretivas, ou definições de características, para assegurar que materiais, produtos, processos e serviços são adequados ao seu propósito. As normas apresentam o consenso de opinião entre os especialistas.

### 6.1 Normas Nacionais e Internacionais

Existem diversas normas nacionais e internacionais que estabelecem critérios de aceitação dos níveis de vibração do motor operando em vazio e outras que sugerem critérios para avaliação do funcionamento das máquinas elétricas e máquinas em geral operando em carga. Dentre as normas relacionadas ao assunto podem ser citadas:

#### 6.1.1 Normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)

- NBR 8007 Balanceamento – Terminologia.
- NBR 8008 Balanceamento de corpos rígidos rotativos – Qualidade
- NBR 10082 Vibração mecânica de máquinas com velocidade de operação de 600 rpm a 12.000 rpm – Bases para especificação e padrões de avaliação.
- NBR 10272 Medição e avaliação da severidade de vibrações mecânicas de máquinas elétricas rotativas com altura de eixo entre 80 mm e 400 mm.
- NBR 10273 Vibração mecânica de máquinas rotativas e alternativas – requisitos para instrumentos de medição de severidade de vibração.
- NBR 11390 (EB 2072) Máquinas elétricas rotativas – Medição - Avaliação e limites de severidade de vibração mecânica de máquinas de altura de eixo igual ou superior a 56 mm.

### **6.1.2 Normas IEC (*International Electrotechnical Commission*)**

- IEC 60034-14 *Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity.*

### **6.1.3 Normas ISO (*International Organization for Standardization*)**

- ISO 1940-1 *Mechanical vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state – Part I: specification and verification of balance tolerances.*
- ISO 1940-2 *Mechanical vibration – Balance quality requirements of rigid rotors- Part 2: Balance errors.*
- ISO 2954 *Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery – requirements for instruments for measuring vibration severity.*
- ISO 7919-1 *Mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria – Part 1: General Guidelines.*
- ISO 7919-3 *Mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria – Part 3: Coupled industrial machines.*
- ISO 7919-5 *Mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria – Part 5: Machines sets in hydraulic power generating and pumping plants.*
- ISO 8528-9 *Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets – Part 9: Measurement and evaluation of mechanical vibrations.*
- ISO 8821 *Mechanical vibration – Balancing – Shaft and fitment key convention.*
- ISO 10814 *Mechanical vibration – Susceptibility and sensitivity of machines to unbalance.*
- ISO 10816-1 *Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements of non-rotating parts – Part 1: General Guidelines. (substitui a antiga VDI/ISO 2372).*
- ISO 10816-3 *Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements of non-rotating parts – Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 rpm and 15.000 rpm when measured in situ.*
- ISO 10817-1 *Rotating shaft vibration measuring systems – Part 1: Relative and absolute sensing of radial vibration.*

- ISO 13373-1 *Condition monitoring and diagnostics of machines – vibration condition monitoring – Part 1: General procedures.*
- ISO 13373-2 *Condition monitoring and diagnostics of machines – vibration condition monitoring – Part 2: Processing, analysis and presentation of vibration data.*
- ISO 15242-2 *Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 2: Radial ball bearings with cylindrical bore and outside surface.*
- ISO 15242-3 *Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 2: Radial spherical and tapered roller bearings with cylindrical bore and outside surface.*
- ISO 16063-1 *Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1: Basic concepts.*
- ISO 16063-21 *Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 21: Vibration calibration by comparison with a reference transducer.*
- ISO 18436-2 *Condition monitoring and diagnostics of machines – requirements for training and certification of personnel - Part 2: Vibration condition monitoring and diagnostics.*
- ISO 20806 *Mechanical vibration – Criteria and safeguards for the in situ balancing of medium and large rotors.*

#### **6.1.4 Normas NEMA (National Electrical Manufacturers Association)**

- NEMA MG 1 – Part 7 - *Mechanical vibration measurement, evaluation and limits.*

#### **6.1.5 Normas IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)**

- IEEE Std 841 *IEEE standard for petroleum and chemical industry – Severe duty totally enclosed fan-cooled (TEFC) squirrel cage induction motors – Up to and including 370 kW (500 hp).*

#### **6.1.6 Normas BS (British Standard)**

- BS 4999 – 142 *General requirements for rotating electrical machines, specification for mechanical performance: Vibration.*

#### **6.1.7 Normas API (American Petroleum Institute)**

- API 541 *Form-wound squirrel-cage induction motors – 500 hp and larger.*
- API 546 *Brushless synchronous machines – 500 kVA and larger.*

- API 547 *General-purpose form-wound squirrel cage induction motors – 250 hp and larger.*
- API 670 *Machinery protection systems.*
- API 684 *Rotordynamics tutorial: Lateral critical speeds, unbalance response, stability, train-torsional and rotor balancing.*

## 6.2 Principais Normas de Medição de Vibração em Vazio

As normas de interesse que estabelecem os critérios de aceitação de vibração das máquinas elétricas rotativas operando em vazio são a norma **NBR 11390**, a norma **IEC60034-14**, a norma **NEMA MG 1 Part 7** e a norma **IEEE 841**.

A bordagem das principais normas de medição de vibração em vazio será apenas a útil para o *Diagnóstico de Máquinas Elétricas pela Análise da Vibração* visto que o mesmo tem principal enfoque em análises de máquinas em funcionamento.

### 6.2.1 Campo de Aplicação e Parâmetros de Medição

A Tabela 5 procura resumir o campo de aplicação e os parâmetros de medição das principais normas que estabelecem critérios de medição de vibração de máquinas elétricas rotativas operando em vazio.

NORMA	NBR 11390	IEC 60034-14	NEMA MG1-7	IEEE 841
Tipo de Máquina	Corrente contínua e corrente alternada trifásicas	Corrente contínua e corrente alternada trifásicas	Corrente contínua e corrente alternada trifásicas	Motores de indução de gaiola, polifásicas, TEFC, veloc. única
Altura de Eixo	≥ 56 mm	≥ 56 mm	≥ NEMA 42	≥ NEMA 143T
Potência Nominal	≤ 50 MW	≤ 50 MW	≤ 75 MW	≤ 370 kW
Faixa para medição com transdutores absolutos	600 rpm a 3.600 rpm	120 rpm a 15.000 rpm	≤ 3.600 rpm	≤ 3.600 rpm
Parâmetros de medição absoluta	Valor eficaz da velocidade de vibração em mm/s	Valores eficazes de: deslocamento em $\mu\text{m}$ , velocidade em mm/s, aceleração em $\text{m/s}^2$ .	Valor zero-pico da velocidade de vibração em in/s	Valor zero-pico da velocidade de vibração em mm/s
Faixa para medição com transdutores relativos	-----	Rotação acima de 1200 rpm e Potência > 1000 kW	Rotação acima de 1000 rpm	-----
Parâmetros de medição relativa	-----	Valores pico-pico de deslocamento em $\mu\text{m}$	Valores pico-pico de deslocamento em mil. (milésimos de polegada).	-----
Faixa de frequências de medição	Pelo menos de 10 Hz a 1000 Hz (referência a IEC 34-14)	Pelo menos de 10 Hz a 1000 Hz (ref. ISO 2954)	10 Hz a 10 kHz	-----
Fixação da máquina.	Base elástica e base rígida	Base elástica e base rígida	Base elástica e base rígida	Base elástica e base rígida

Tabela 5 – Campo de aplicação de alguns parâmetros das principais normas.

### 6.2.2 Pontos Recomendados de Medição de Vibração

Os pontos de medição de vibração nas máquinas elétricas rotativas são padronizados da mesma maneira, nas diversas normas (IEC 60034-14, NEMA MG-1 Part 7, NBR 11390 e IEEE 841), havendo diferenças somente na nomenclatura.

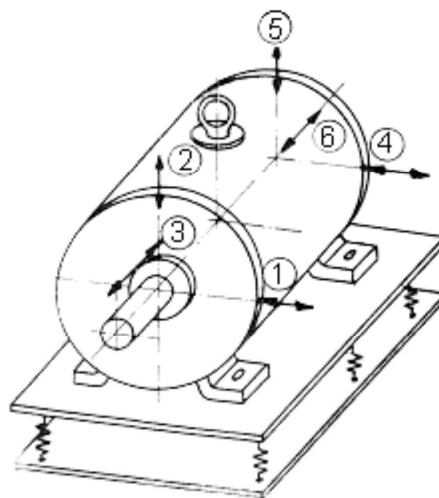


Figura 51 - Pontos de medição de vibração segundo as normas, (WEG, 2012)

Os pontos 1, 2 e 3 de medição devem estar o mais próximo possível do apoio dianteiro, sendo o ponto 1 na direção radial horizontal, o ponto 2 na direção radial vertical e o ponto 3 na direção axial. Os pontos 4, 5 e 6 devem estar o mais próximo possível do apoio traseiro, sendo o ponto 4 na direção radial horizontal, o ponto 5 na direção radial vertical e o ponto 6 na direção axial.

Se não for possível a fixação do sensor de vibração diretamente sobre o apoio, o ponto de medição deverá ser o mais próximo deste. Deve-se evitar a colocação do sensor de medição sobre superfícies que não ofereçam rigidez adequada, conforme ilustrado na Figura 52.

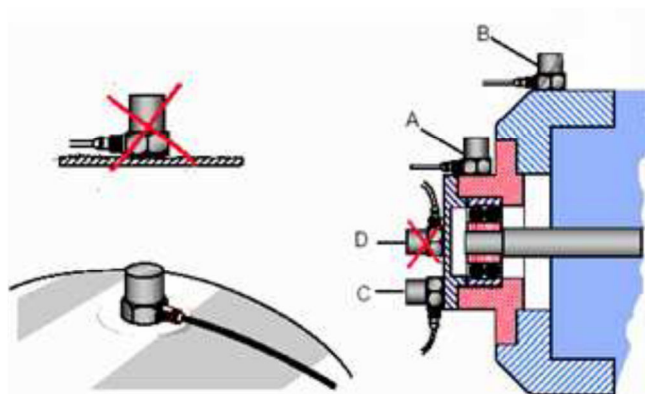


Figura 52 - Recomendações dos fabricantes quanto à localização do sensor de vibração (WEG, 2012).

As condições A e C na figura 52 representam as melhores posições, pois oferecem maior rigidez à transmissão de vibração proveniente do apoio. A posição D deve ser evitada, devido à possibilidade de amplificação da vibração, por causa da falta de rigidez local. Quando não é possível medir no ponto A, a posição B também é aceitável.

No caso de uso de sensores de deslocamento, as normas IEC 60034-14 e NEMA MG 1 Part 7, recomendam que devem ser instalados aos pares, a 90° um do outro.

Para máquinas verticais, a norma IEC 60034-14 estabelece que os pontos de medição deverão ser conforme as setas indicadas na Figura 52.

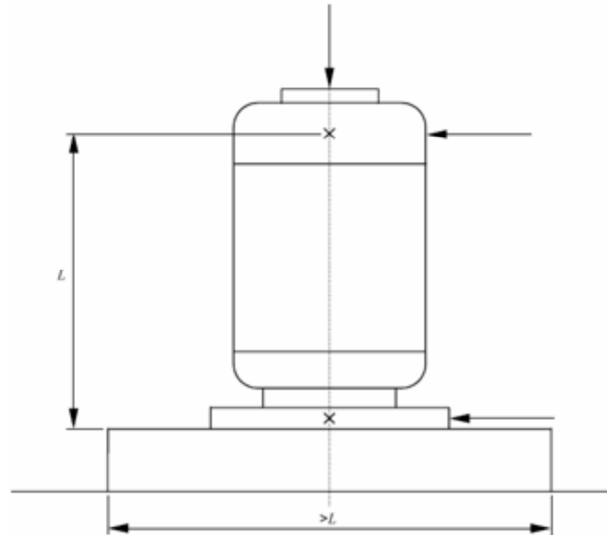


Figura 53 -Pontos de medição de vibração verticais segundo a IEC 60034-14

### 6.2.3 Apoio Elástico para Ensaio das Máquinas Elétricas

As normas IEC 60034-14, NEMA MG 1 Part 7 IEEE 841 e NBR 11390, estabelecem condições de medição em suspensão livre e em base rígida para ensaio das máquinas elétricas rotativas. A norma IEEE 841 subentende as mesmas especificações da norma NEMA para a condição de suspensão livre.

A condição livre pode ser obtida dependurando a máquina em uma mola ou colocando-a sobre uma base elástica, conforme a Figura 54.

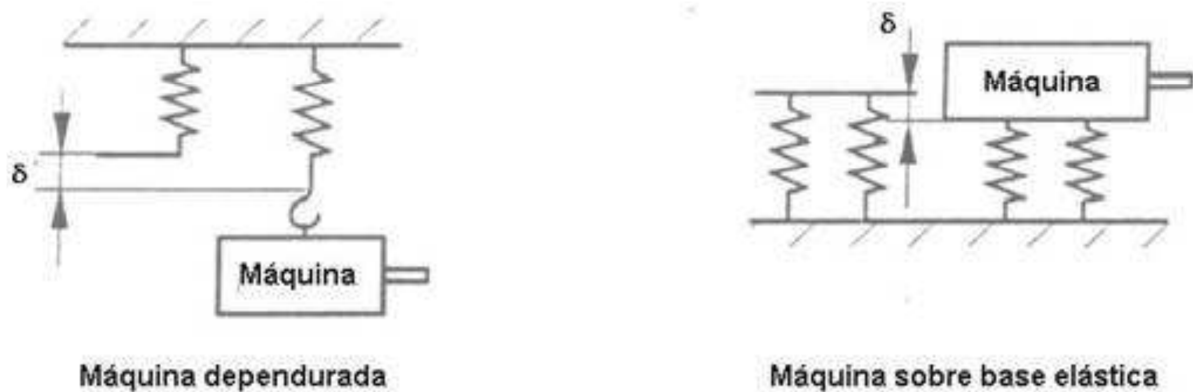


Figura 54 - Deformação da mola e da base elástica sob ação do peso próprio da máquina.

### 6.2.4 Fixação em Base Rígida para Ensaio das Máquinas Elétricas

A norma IEEE 841 estabelece que todos os ensaios de vibração, independente da polaridade, sejam também feitos em base rígida.

O objetivo da montagem das máquinas de 2 pólos em base rígida, estabelecido nas normas IEC e NEMA é de avaliar o valor da componente de vibração na frequência de 2 vezes a frequência da rede elétrica:

- A norma IEC 60034-14 estabelece que as máquinas de dois pólos requerem também medição de vibração com montagem em base rígida, além do ensaio em base elástica;
- A norma NEMA MG 1 Part 7 sugere que todas as máquinas de 2 pólos com altura de eixo acima 11 polegadas deverão ser ensaiadas em base rígida.

A Tabela 6 mostra os requisitos que devem ser satisfeitos pela base rígida, de acordo com as diferentes normas de vibração. Nesta montagem a máquina deve estar firmemente presa à base.

	NBR 11390	IEC 60034-14	NEMA MG1-7	IEEE 841
% da vibração da base em relação ao correspondente ponto do mancal	50%	25%	25%	Não faz esta exigência.
fn (frequências naturais)	não coincidente com frpm	Fora da faixa: ± 10% em torno de frpm	Fora da faixa: ± 10% em torno de frpm	Fora da faixa: ± 25% em torno de frpm
	não coincidente com (2 x frpm)	Fora da faixa: ± 5% em torno de (2 x frpm)	Fora da faixa: ± 5% em torno de (2 x frpm)	Fora da faixa: ± 25% em torno de (2 x frpm)
	não coincidente com (2 x frede)	Fora da faixa: ± 5% em torno de (2 x frede)	Fora da faixa: ± 5% em torno de (2 x frede)	Fora da faixa: ± 25% em torno de (2 x frede)

Tabela 6 - Requisitos a serem satisfeitos pela base rígida. (WEG, 2012).

Onde:

- fn = frequência natural da base;
- frpm = frequência de rotação mecânica;
- frede = frequência da rede elétrica.

### 6.2.5 Balanceamento

O balanceamento é o processo que procura melhorar a distribuição de massas de um corpo, de modo que gire nos seus apoios com minimização das forças centrífugas desbalanceadas. O desbalanceamento residual é um dos principais fatores que podem provocar vibração de um

motor elétrico. Recomendam-se diferentes classes de qualidade de balanceamento para satisfazer os diferentes graus de vibração. As classes de qualidade de balanceamento são definidas nas normas NBR 8008 e ISO 1940 e são dadas em termos da excentricidade do centro de massa do rotor em relação ao centro de rotação e da velocidade angular de rotação do rotor. A especificação da classe de qualidade de balanceamento é função do grau de vibração exigido.

### 6.3 Normas que Sugerem Limites de Vibração em Serviço

As normas internacionais que estabelecem orientações gerais para medição e avaliação de vibração e sugerem limites na condição operacional são as séries de normas ISO 7919 e ISO 10816. A série de normas ISO 7919 é voltada para medição e avaliação da vibração relativa do eixo, sendo aplicável às máquinas com apoios de deslizamento hidrodinâmico. A série de normas ISO 10816 é voltada para a medição e avaliação de vibração absoluta das partes não rotativas, sendo aplicável tanto para as máquinas com apoios de rolamentos como para máquinas com apoios de deslizamento hidrodinâmico. Estas séries de normas substituíram a antiga norma ISO 2372 – *Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s -- Basis for specifying evaluation standards*.

NORMA	ISO 7919-1	ISO 10816-1
Aplicação	Monitoramento operacional, testes de aceitação e diagnóstico e investigação analítica através da medição da vibração do eixo. Fornece guias gerais: tipos específicos de máquinas são abordados nas demais partes da norma	Monitoramento operacional, testes de aceitação e diagnóstico e investigação analítica através da medição da vibração absoluta. Fornece guias gerais: tipos específicos de máquinas são abordados nas demais partes da norma
Parâmetros de medição.	Preferencialmente valores de deslocamento pico-pico em $\mu\text{m}$	Deslocamento em $\mu\text{m}$ , velocidade em $\text{mm/s}$ , aceleração em $\text{m/s}^2$ . É importante sempre identificar claramente a unidade usada (e indicar se é zero-pico, pico-pico ou r.m.s)
Faixa de frequências de medição	Banda larga (pelo menos de 10 Hz a 1000 Hz)	Banda larga (pelo menos de 10 Hz a 1000 Hz)

Tabela 7 - Resumo do campo de aplicação e os parâmetros de medição das principais normas que estabelecem critérios de medição de vibração de máquinas elétricas rotativas na condição operacional (WEG, 2012).

### **6.3.1 Pontos de Medição de Vibração Segundo a Norma ISO 10816-1**

Os pontos de medição de vibração na máquina elétrica são definidos da mesma forma que os pontos das normas IEC 60034-14 e NEMA MG1-Part 7 quando forem testes de aceitação. Para a condição de Monitorização operacional, com sensores absolutos, basta uma ou duas posições radiais por apoio (direção horizontal e/ou vertical). Esta medição pode ser suplementada pela medição de vibração axial.

### **6.3.2 Condição de Fixação da Máquina Segundo a Norma ISO 10816-1**

Quando os testes de vibração são feitos “*in-situ*”, no local final de operação da máquina, é necessário assegurar que a maioria dos componentes da máquina ou estrutura estejam montados.

Quando o teste de aceitação é feito em outro local que não o local de operação definitivo, é necessário assegurar que as frequências naturais do conjunto completo em teste não coincidam ou estejam próximas da frequência de rotação e/ou qualquer uma de suas múltiplas. A norma ISO 10816-1 considera que esta condição é atendida quando as vibrações nos pés ou na base, próximo aos pés da máquina, não ultrapassarem 50% das correspondentes vibrações medidas nos apoios.

É necessário assegurar que as vibrações ambientais provenientes do solo não estejam contribuindo com as vibrações medidas na máquina. A avaliação da vibração ambiente deve ser feita com a máquina desligada. Esta vibração não deveria ultrapassar 1/3 da correspondente vibração do apoio com a máquina ligada.

### **6.3.3 Critérios de Avaliação da Vibração Segundo a Norma ISO 10816-1**

O critério de avaliação da vibração se relaciona tanto ao Monitorização de vibração quanto aos testes de aceitação. Segundo a norma ISO 10816-1 existem dois critérios de avaliação da severidade de vibração. O primeiro critério considera apenas a magnitude da vibração medida em banda larga, e o segundo considera as variações da magnitude da vibração, quando ela aumenta ou diminui.

#### **Critério I: Magnitude da vibração:**

Este critério se relaciona com a definição de limites da magnitude de vibração absoluta consistente com as cargas dinâmicas aceitáveis nos apoios e a transmissão aceitável da vibração para a estrutura suporte e fundação. A magnitude da vibração máxima (severidade da

vibração) observada nos apoios ou pedestais pode ser classificada em quatro zonas, estabelecidas na experiência internacional, Tabela 8.

Zona	Descrição
A	Maquinas recém-fornecidas.
B	Vibração considerada aceitável para operação sem restrições
C	Vibração considerada inaceitável para operação contínua. Geralmente, a máquina pode operar por um período limitado, até uma oportunidade de correção do problema.
D	Vibração considerada suficiente para causar danos à máquina.

Tabela 8- Zonas de avaliação da severidade de vibração segundo a norma ISO 10816-1.

Para a maioria das máquinas, independente dos tipos de apoios usados, a medição em banda larga (sobre uma larga faixa de frequências) da velocidade de vibração r.m.s. nas partes estruturais tais como alojamentos dos apoios, caracteriza adequadamente a condição de operação dos elementos rotativas do eixo e a severidade de vibração da máquina. A Figura 55 traz um gráfico ilustrativo dos patamares limites de velocidade constante de vibração r.m.s. em uma larga faixa de frequências entre  $f_x$  e  $f_y$  (faixa 2), definindo as zonas de aceitação de vibração. Para frequências muito baixas (faixa 1 abaixo de  $f_x$ ) ou frequências muito altas (faixa 3 acima de  $f_y$ ) é necessário medir o deslocamento ou a aceleração de vibração, respetivamente. As frequências  $f_x$  e  $f_y$  são especificadas nas partes adicionais da norma ISO 10816.

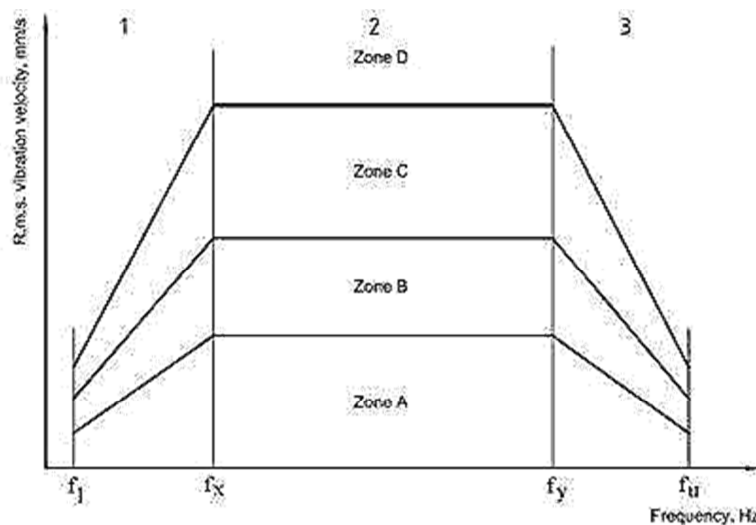


Figura 55 - Representação gráfica das zonas de avaliação de vibração da norma ISO 10816-1.

O apêndice C da norma ISO 10816-1 sugere patamares de velocidade de vibração para as quatro zonas de avaliação da vibração para diferentes classes de máquinas, classificadas de acordo com a potência e tipo de fundação. A tabela 9 traz estas sugestões:

Velocidade de vibração mm/s rms	< 15 kW Classe I	15 kW ≤ P ≤ 75 kW Classe II	P > 75 kW (base rígida) Classe III	P > 75 kW (base flexível) Classe IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1				
11,2	D	D	D	D
18				
28				
45				

Tabela 9 - Valores de severidade de vibração sugeridos na norma ISO 10816-1.

### **Critério II: Mudança na Magnitude de Vibração:**

Mudanças significativas da magnitude de vibração podem ocorrer e requerem alguma ação, mesmo que o patamar limite da Zona C do Critério I não tenha sido atingido. Tais mudanças podem ser instantâneas ou progressivas com o tempo e podem indicar que ocorreu um dano, ou é um alerta de dano iminente, ou alguma irregularidade.

O Critério II é especificado com base nas mudanças da magnitude de vibração de banda larga sob condição de operação em regime permanente. Entretanto, algumas mudanças não podem ser notadas, a menos que as componentes em frequências discretas sejam monitoradas.

Na aplicação do Critério II, as medições para comparação deveriam ser tomadas com o mesmo sensor, local e orientação, sob as mesmas condições de operação da máquina.

Os critérios das mudanças de vibração na Monitorização em banda larga são abordados nas partes adicionais da norma ISO 10816.

### 6.3.4 Limites operacionais de vibração segundo a norma ISO 10816-3

Para a operação contínua de alguns tipos de máquinas, é uma prática comum estabelecer limites de vibração operacional. Estes limites tomam a forma de valores de **Níveis de Alarme e Níveis Para Retirada de Serviço** (*Trip*).

- **Níveis de Alarme:**

Os níveis de alarme são aqueles que definem um valor limite de vibração, ou uma mudança significativa no nível de vibração, e que indicam a necessidade de uma avaliação da máquina. Em geral, se um nível de alarme acontecer, a operação da máquina pode continuar por um período de investigação da causa das mudanças da vibração e definição de correções a serem feitas.

Os níveis de alarme podem variar consideravelmente para diferentes máquinas. Os valores deveriam ser normalmente tomados da experiência, a partir da linha base de operação, para cada posição ou direção de medição, para cada máquina. É recomendável que o valor de alarme seja mais alto do que a linha base de operação da máquina de uma quantidade igual à uma proporção do limite superior da zona B. A norma ISO 10816-3 (“*Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 rpm and 15000 rpm when measured in situ*”) recomenda que esta proporção seja igual a 25% do limite superior da zona B. Se a linha base de vibração da máquina é baixa, o nível de alarme pode estar abaixo do limite superior da zona B. Porém, a norma ISO 10816-3 recomenda que o nível de alarme não ultrapasse 1,25 vezes o limite superior da zona B.

Para máquinas novas, o nível de alarme deveria ser tomado com base na experiência de máquinas similares, ou relativo a um valor aceitável acordado. Depois de algum tempo de funcionamento e, após ser estabelecida a linha base de operação, o nível de alarme pode ser ajustado.

- **Níveis Para Retirada de Serviço:**

Os níveis de Retirada de serviço são aqueles além dos quais uma operação da máquina poderia causar danos. Se os níveis de Retirada de serviço são atingidos, a máquina deveria ser desligada imediatamente ou uma ação imediata deveria ser tomada para reduzir a vibração.

Estes valores são relacionados à integridade mecânica da máquina e dependentes de características específicas de projeto introduzidas para melhorar a resistência mecânica. Não são, portanto, dependentes da linha base de operação da máquina e deveria ser o mesmo para

máquinas de projetos semelhantes. Normalmente situam-se entre as zonas C e D. Porém, a norma ISO 10816-3 recomenda que os valores de retirada de serviço não ultrapassem 1.25 vezes o limite superior da zona C.

## 7 Opções de Projeto

Para prova de veracidade do projeto foi necessário recorrer a um sensor e se efetuar a aquisição do sinal elétrico gerado pela vibração mecânica, sinal elétrico pois com recurso a um sensor seria convertida a energia proveniente da aceleração dos chassis das máquinas para um sinal elétrico.

### 7.1 Escolha do Sensor

Inicialmente foi ponderado o uso de um microfone de alta fiabilidade para servir como conversor do sinal sonoro emitido pelo funcionamento das máquinas, para um sinal elétrico. Esta solução veio a verificar-se não ser a melhor forma de aquisição do sinal. Pois em ambientes industriais surgem ruídos que podem facilmente ser confundidos e inseridos no som produzido pelo normal funcionamento da máquina podendo assim fundir-se e adulterar o sinal negativamente numa análise que se pretende “limpa” e sem ruídos, procura-se que o sinal obtido seja uma assinatura do funcionamento da máquina e que seja reflexo da condição real.

Como exemplo da inviabilidade da aquisição do sinal por via do microfone, ao considerar uma análise num ambiente industrial com guilhotinas para corte de chapa, na altura do corte é produzido um ruído capaz de inviabilizar, distorcendo por completo o sinal, ao criar picos na amplitude do sinal. Os referidos picos de amplitude, seriam erradamente alvo de estudo ao sair do intervalo “normal”.

O instrumento habitualmente utilizado na medição de vibrações é o coletor de dados de vibrações, que utiliza um sistema conversor de vibrações mecânicas em sinais elétricos conhecido como acelerómetro. Após a abordagem não vinculativa sobre a possibilidade de aquisição do sinal com recurso a um microfone de alta capacidade, identificou-se o acelerómetro como potencial instrumento para aquisição do sinal, pois a sua origem e desenvolvimento tem como base a transformação de vibrações mecânicas em sinais elétricos. A escolha do acelerómetro deve ser objetiva e orientada, a oferta destes sensores no mercado é enorme muito diversificada.

Para o projeto o modelo utilizado inicialmente foi o *SDT1-028K* do fabricante *Measurement Specialties*, na Figura 59 está presente o aspeto deste sensor. A escolha por este sensor nasceu da necessidade de redução de custos para a aquisição do mesmo, para uma análise detalhada seria necessário um acelerómetro de 3 eixos para assim ser possível identificar mais que uma causa que originou a vibração na máquina, mas dado que os valores de aquisição dos acelerómetros eram elevados, isto porque para o diagnóstico de máquinas elétricas não podem ser utilizados acelerómetros típicos de robótica onde os seus valores normalmente estão entre os 50€ e os 90€, a Figura 56 mostra um desses sensores que tipicamente são utilizados na robótica industrial.



Figura 56 – Acelerómetro de 3 eixos tipicamente utilizado na robótica industrial.

Alem destes sensores não serem adequados para o efeito pois a sua robustez e dimensões são reduzidas, eram necessárias verbas que não dispomos. Os mais adequados para este tipo de aplicação são os acelerómetros construídos a pensar em aplicações mais complexas e ambientes mais adversos. A Figura 57 mostra um dos acelerómetros industriais uniaxiais mais utilizados na indústria, o mesmo apresenta inúmeras vantagens, o seu preço que ronda os 100€ faz com que esteja integrado numa categoria dos mais económicos para o efeito, a sua versatilidade é enorme pois dispõe de uma extremidade com rosca pelo interior que permite o fácil acoplamento às máquinas em estudo, desde que estas disponham de um parafuso roscado para sua fixação. Depois nesta categoria de acelerómetros industriais ai o intervalo de valores de aquisição é imensurável pois tudo depende das suas características, frequência, sensibilidade, índice de proteção (IP), índice de resistência mecânica (IK), mais relevante ainda quando a leitura recai sobre os 3 eixos.



Figura 57 – Acelerómetro industrial 8032-01 da *Measurement Specialties*.

Com as condicionantes apresentadas foi necessário encontrar alternativa que nos permitisse provar pelo menos a veracidade dos níveis de vibração para uma causa identificada no capítulo das Causas da Vibração Mecânica, a primeira causa escolhida é o desbalanceamento, pois é uma das causas mais habituais do aparecimento de vibrações nas máquinas elétricas. Em reforço verifica-se que ao ser um problema onde a amplitude de vibração é maior na direção radial nos possibilita a utilização de um sensor de apenas um eixo, logo custos de aquisição menores.

Por contacto com o fornecedor MRA – Instrumentação S.A. e com o fabricante MEAS - Measurement Specialties S.A.. Ambos com grande experiência em acelerómetros, foi aconselhado um acelerómetro alternativo de baixo custo sendo o modelo SDT1-028K que suporta temperaturas entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$  e opera temperaturas entre  $0^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$ , consegue abranger frequências até 50KHz como se pode visualizar na Figura 58, o defeito a simular encontra-se na frequência 1xRPM por isso estamos salvaguardados quanta á frequência (MRA, 2012) (MEAS, 2012).

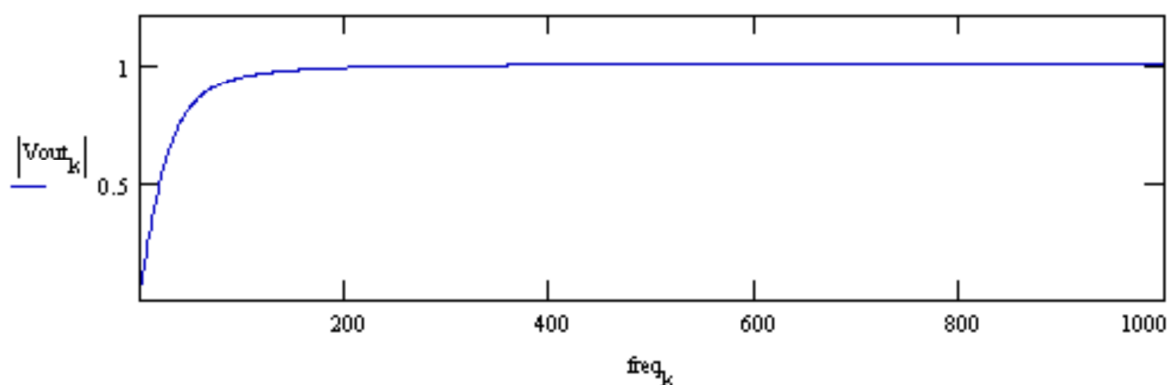


Figura 58 – Curva de resposta do sensor SDT1 (MEAS, 2012).

O sensor SDT1-028K embora limitador na gama de causas a estudar por ser apenas de um eixo vai de encontro com o princípio e ideologia do projeto, pois é portátil e não necessita de alimentação para funcionar. Os sensores SDT são sensores do tipo piezoelétrico, sendo assim um dispositivo que usa o efeito piezoelétrico para medir a aceleração e converter em sinal elétrico. Este tipo de sensores passivos não interfere com a carga medida. A sua corrente interna pode ser calculada pela lei de Ohm em que a tensão é aproximadamente igual à resistência.

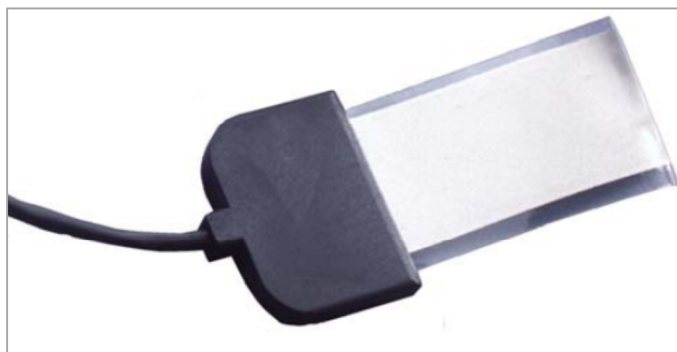


Figura 59 - Sensor utilizado inicialmente, modelo STD1 da Measurement Specialties.

## 7.2 Caixa para o Sensor

Como se pode ver pela Figura 59 o sensor STD1-028K não apresenta uma forma física que permita um fácil acoplamento aos chassis das máquinas assim sendo foi estudado uma caixa que permite-se o acoplamento do sensor ao chassi da máquina.

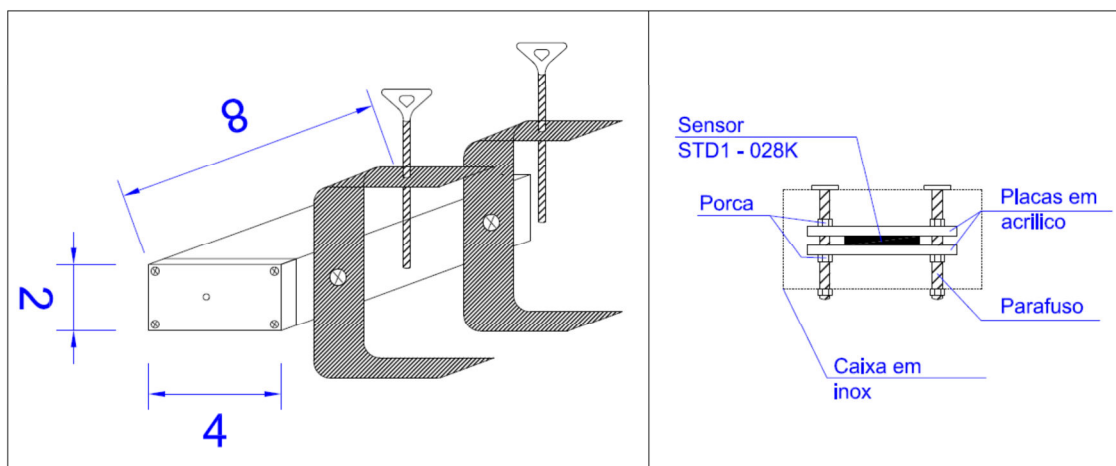
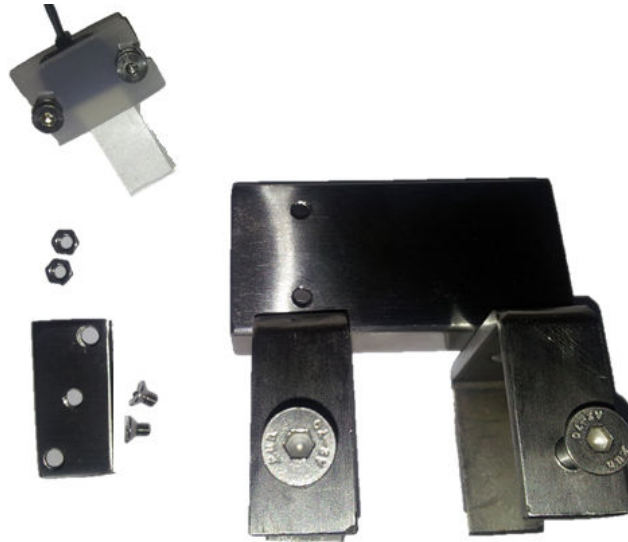
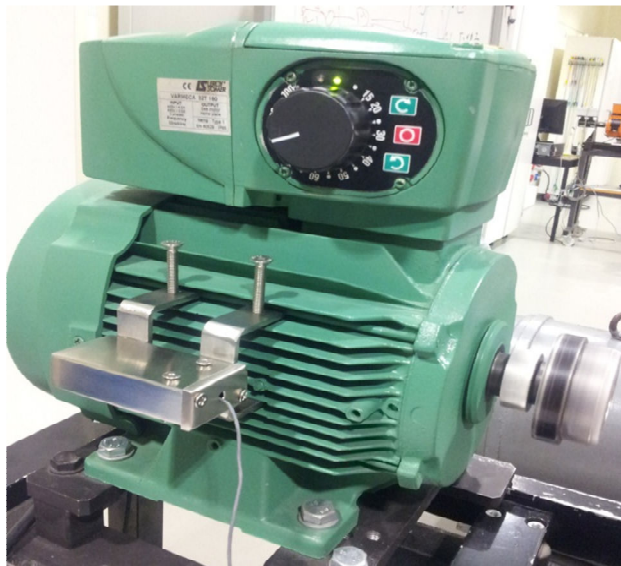


Figura 60 - Desenho de preparação elaborado em AUTOCAD.

A Figura 60 mostra o estudo realizado em AUTOCAD para a possível solução a construir para encapsular o sensor. A Figura 61 mostra a caixa construída, a Figura 62 mostra a caixa e o sensor acoplados á máquina em estudo, a caixa está construída em Inox numa procura por reduzir o seu peso, evitando criar uma massa desbalanceadora.



*Figura 61 - Caixa de Encapsulamento Construída*



*Figura 62 - Caixa com sensor acoplados à máquina de estudo.*

### **7.3 Interface Informática Usada**

O sinal obtido no acelerómetro, por si só, não é indicador de qualquer variável ou estado, precisa ser observado em alguma ferramenta de processamento de sinal, com recurso ao software *Matlab*® é possível estabelecer metodologias e algoritmos na construção de uma aplicação capaz de ilustrar o espectro do sinal adquirido ao longo do tempo.

A entrada de microfone verificou-se a interface mais versátil para a aquisição do sinal eléctrico, pois como a aquisição do sinal se resumiu apenas a um eixo de coordenadas cartesianas não seria necessário o uso de qualquer outra porta/interface informática, evitando a necessidade de mais *hardware* para a conversão do sinal analógico para um sinal digital, necessário na maioria das portas/interfaces informáticas. A entrada microfone está presente em todos os computadores, sejam portáteis, desktops, antigos ou atuais e ainda nos dispositivos moveis de comunicação mais recentes, como é o caso de alguns dos *PDA*<sup>25</sup> ou *Tablets PC* que estão dotados com grande capacidade computacional, sendo assim capazes de correr a aplicação/projeto depois de compilado todo o código num ficheiro com extensão do tipo *\*.exe*.

Pois era pretendido a gravação do sinal em ficheiro áudio em formato com extensão de ficheiro *\*.wav*, formato este compatível com as *toolbox* de processamento de sinal disponíveis no *Matlab*®.

## 7.4 Gravação do Sinal em Ficheiros *\*.wav*

### 7.4.1 Placa de Som, Entrada Microfone (para aquisição de dados)

A placa de som é um periférico quase que indispensáveis nos PC's sejam eles “domésticos” ou “profissionais”, e além de servir como interface de áudio do microfone é geralmente a única interface de entrada analógica presente em nos computador habituais, podendo ser considerada como um conversor analógico/digital e digital/analógico, seguindo o princípio da Figura 63

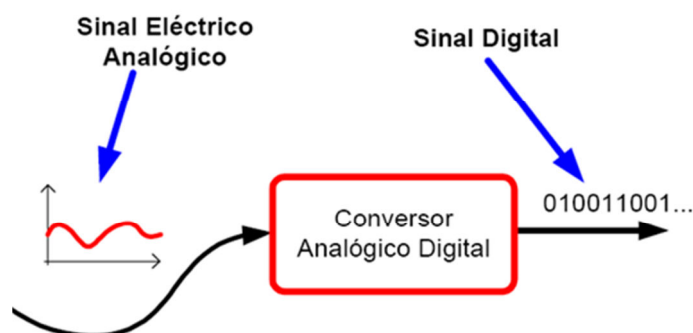


Figura 63 - Princípio da conversão analógico-digital da placa de som.

<sup>25</sup> *PDA - Personal digital assistants.*

A placa de som pode perfeitamente desta forma exercer o papel de dispositivo de aquisição, pois possui os componentes necessários para esse fim e com a vantagem de ter um custo muito menor do que de uma placa de aquisição de dados.

Uma desvantagem da placa de som em relação a placa de aquisição de dados é que a captação de dados não é tão rápida; porém, para um laboratório para o diagnóstico de máquinas elétricas a precisão é suficiente.

Abaixo são apresentadas algumas características das placas de som que são importantes sob a visão de um dispositivo de aquisição:

- **Entradas e saídas:** As placas de som normalmente possuem duas entradas e duas saídas. As entradas são chamadas line in e mic in. Já as saídas são chamadas line out e spk out, portanto pode-se ter dois canais de entrada e dois canais de saída. Uma observação importante a ser feita é que quando se utiliza a entrada Mic in, devido a mesma possuir uma impedância baixa (600 Ohms) essa entrada fica suscetível a ruídos (Murasugi, 2003).
- **Amplificador:** A placa de som geralmente possui duas saídas, uma de linha - chamada line out -, que não é amplificada, e uma saída amplificada, chamada spk out (Murasugi, 2003).
- **Mixer:** O mixer da placa de som é controlado por software e controla os níveis das entradas e das saídas da placa de som (Murasugi, 2003).

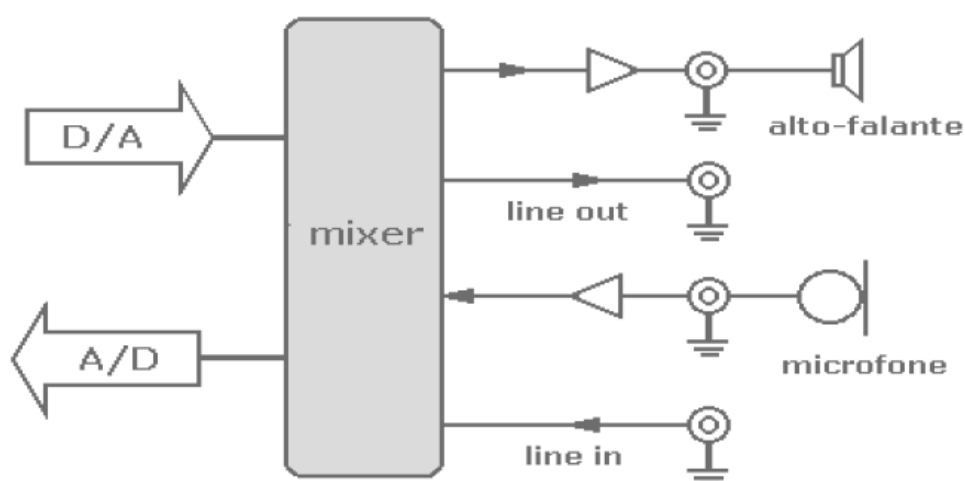


Figura 64 - Esquema das Entradas e Saídas de uma Placa de Som (Murasugi, 2003).

- **Resolução:** O número de bits define a resolução do áudio ou dado capturado e reproduzido pela placa de som (Murasugi, 2003). As placas de som atualmente possuem 32 bits.
- **Taxa de amostragem:** É a quantidade de pontos por segundo que é capturada ou reproduzida pela placa de som, quanto maior for a taxa de amostragem maior será a originalidade da representação do sinal adquirido. A maioria das placas de som trabalha com uma taxa máxima de 44.1 KHz. Diversas placas de som conseguem trabalhar com uma taxa de amostragem maior, em geral 48 KHz (Murasugi, 2003).
- **Resposta de frequência:** É a faixa de frequência que uma placa de som consegue capturar ou reproduzir. A resposta de frequência padrão adotada mundialmente é a faixa de 20 Hz a 20 KHz. Placas de som de melhor qualidade possuem uma resposta de frequência maior do que essa (Murasugi, 2003).
- **Relação sinal/ruído:** Essa característica mede o nível de ruído gerado pela placa de som. A maioria das placas de som possui uma péssima relação sinal/ruído (Murasugi, 2003).
- **Conversor Analógico Digital / Digital Analógico:** O conversor digital/analógico (DAC) e analógico/digital (ADC) de uma placa de som têm um atraso inerente. A latência<sup>26</sup> típica de um conversor está na faixa de 30 a 50 amostras de áudio (*samples*), o que representa 1 a 1,5 milissegundos de atraso quando se opera com uma taxa de amostragem de 44.1 kHz. Porém como citado anteriormente esse atraso para fins de experimentos didáticos não é impeditivo (Murasugi, 2003).

A escolha da entrada microfone para captura do sinal foi tida como a mais indicada fruto de possibilitar a gravação do espectro do sinal elétrico analógico em formato de extensão. *WAV*.

Não era necessário qualquer montagem eletrônica de adaptação entre o sinal do acelerómetro SDT1-028K e a entrada mic, os níveis (tensão e corrente) do acelerómetro já apresentam valores “saudáveis” para a entrada mic.

#### 7.4.2 Escolha da extensão \*.wav

A escolha pela extensão de ficheiro \*.wav prendeu-se pelo facto de ser um formato reconhecido pelo *Matlab* que dispõe de *Toolbox's* de processamento de sinal criadas para trabalhar ficheiros com extensão \*.wav, essa gravação é feita com *software* de gravação

---

<sup>26</sup> Latência - O tempo necessário para que um sinal viaje de um ponto a outro dentro de um circuito ou rede.

áudio, base dos sistemas operativos, ou de possível instalação no caso da sua ausência. No caso do *Windows 7* esse *software* está instalado mas foi necessário instalar adicionalmente um conversor de ficheiros *\*.wma* para *\*.wav*.

### 7.4.3 Configuração do Jack Áudio

O sinal capturado pelo acelerómetro é apenas a absorção de momentos vibratórios segundo um eixo de coordenadas cartesianas, logo a configuração do Jack será um mono.

O terminal não utilizado encontra-se devidamente isolado abolindo a possibilidade de funcionamento como antena, de forma a evitar o aparecimento de ruídos elétricos.

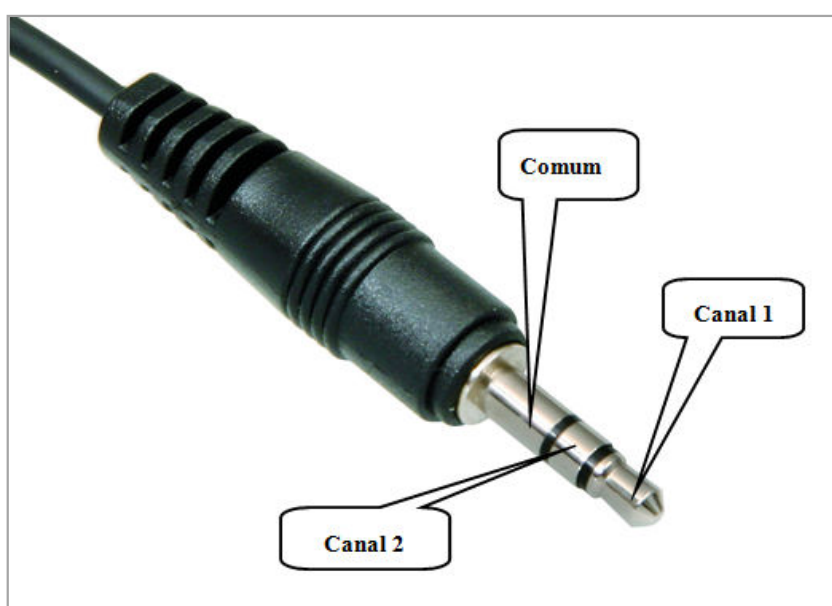


Figura 65 - Configuração do Jack audio 3.5 em mono.

## 7.5 Saturação do Sensor SDT1

As leituras em ambiente real com o sensor SDT1-028K não foram as esperadas pois verificou-se inadequado, as amplitudes de vibração nas maquinas elétricas com funcionamento nominal e em vazio são mínimas e de frequências elevadas, na maquina em estudo possivelmente devido as elevadas frequências a película do sensor não oscilava com níveis capazes de ler os níveis de frequência presentes, o sinal do sensor não era valido e viável para o projeto, pois saturava e apresentava um sinal que facilmente era confundido com alguma causa de vibração, a Figura 66 mostra essa saturação, nas zonas onde não existe a

saturação são zonas onde era reduzido a velocidade da máquina através do regulador incorporado na máquina e visível na Figura 62.

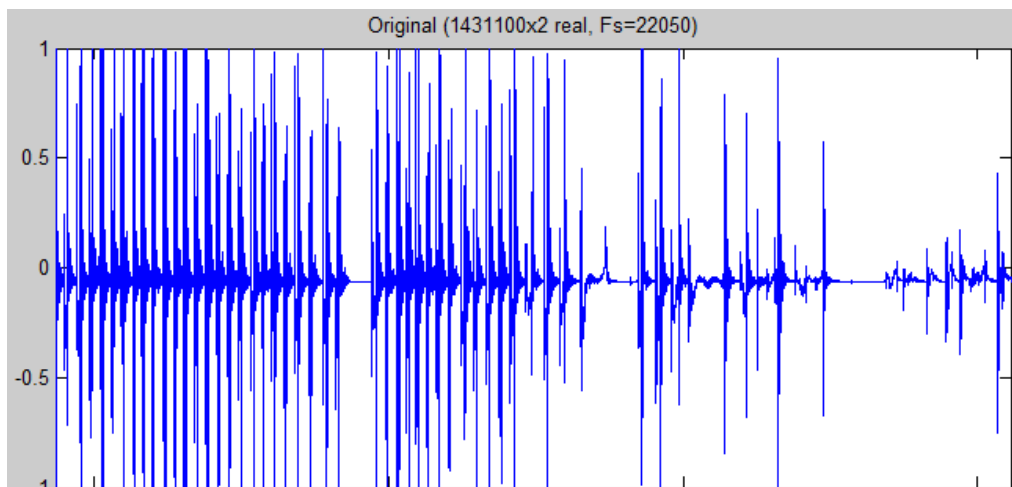


Figura 66 – Sinal real obtido com sensor SDT1-028K.

Perante a impossibilidade de realizar leituras com o acelerómetro inicialmente escolhido surgiu a necessidade de partir para outro sensor, após análise das várias condicionantes, custo ou disponibilidade dos sensores do laboratório de física, recorremos a ajuda do fornecedor *Bresimar – Automação, S.A.*, sendo conhecido e fornecedor da empresa FCDiegues, dispõe de recursos adequados para realizar a captura, diversos acelerómetros, equipamentos e laboratórios *I&D*, entre os vários acelerómetros disponíveis disponham do acelerómetro 8032-01 identificado na Figura 57 como a solução ideal para o projeto.

Com recurso ao acelerómetro 8032-01 e a uma placa de aquisição de dados foram então realizadas capturas, a placa de aquisição de dados possibilitou guardar as capturas em ficheiros com extensão *\*.wav* o que era mais adequado pois a aplicação em *Matlab* não era assim mais um elemento obsoleto, já que com esta solução a caixa de encapsulamento do sensor e a entrada mic firmam obsoletas.

### Foram realizadas 3 capturas:

- **Dados\_Origem.wav** – onde está guardada a assinatura original da máquina
- **Prob\_Desbalanceamento.wav** – onde está guardada a simulação do defeito de desbalanceamento, conseguido com a introdução de uma massa (1Kg) num dos orifícios de um disco perfurado simetricamente e acoplado á máquina.
- **Prob\_Eletricos.wav** – onde está guardada a simulação de um defeito elétrico criado na máquina através de redução dos níveis de tensão numa fase.

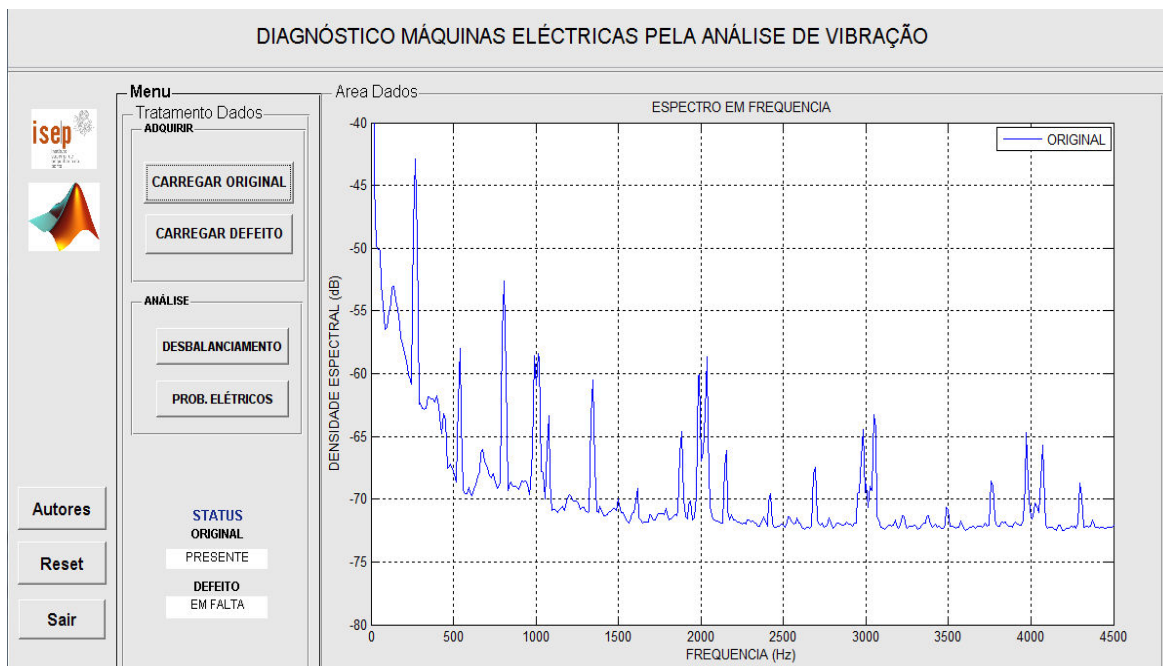


Figura 67 - Visualização do espectro Dados\_Origem.wav na aplicação.

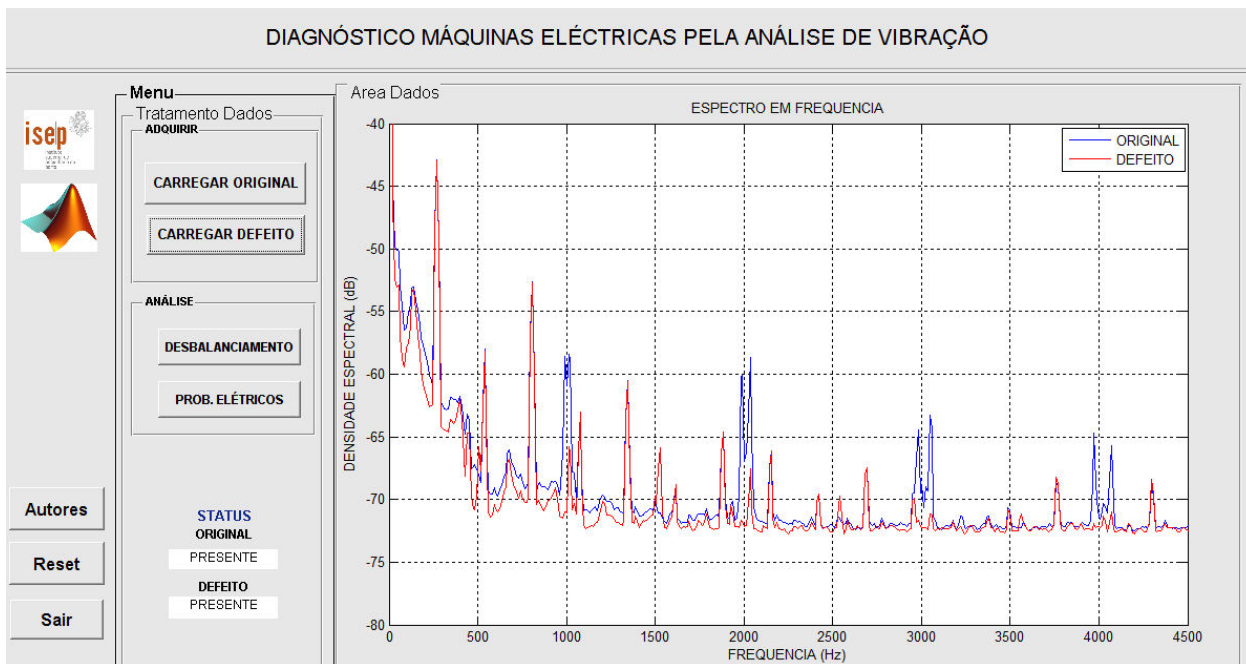


Figura 68 - Visualização espectro Dados\_Origem.wav versus espectro Prob\_Desbalanceamento.wav na aplicação.

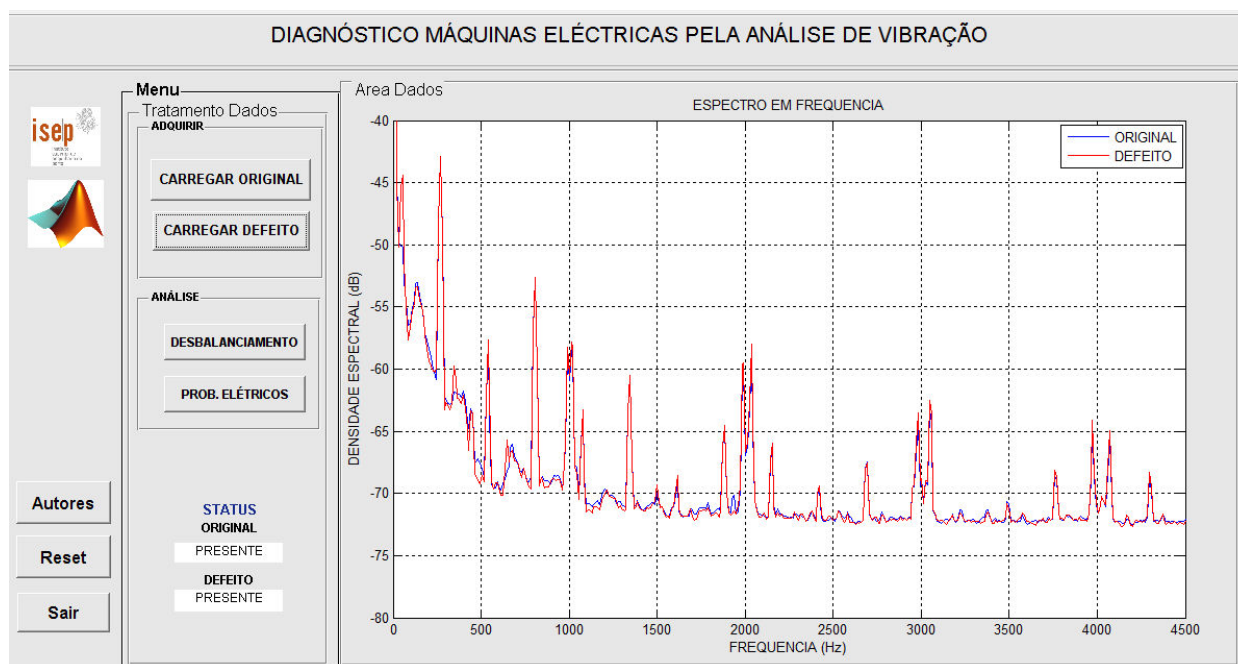


Figura 69 – Visualização espectro Dados\_Origem.wav versus espectro Prob\_Elétricos.wav na aplicação.

A análise de problemas elétricos foi introduzida à prova de veracidade, pois segundo a *Bresimar – Automação S.A.* era possível provar facilmente a veracidade dos níveis característicos de vibração dos problemas elétricos, e sem necessidade de captura de outras variáveis (velocidade por exemplo).

## 7.6 Máquina Utilizada Nas Capturas

A máquina utilizada nas capturas da *Bresimar* apresenta as seguintes características:

<b>Tipo de ligação</b>	Trifásica
<b>Sincronismo</b>	Assíncrona
<b>Potência</b>	1,1 kw
<b>Ligação efetuada</b>	Estrela com tensão composta de 380 (v)
<b>Consumo em Vazio</b>	1,1 (A)
<b>Consumo em carga</b>	2,5 (A)
<b>Frequência</b>	50 Hz
<b>Factor de Potência</b>	$\cos\phi = 0.88$
<b>Número de Polos</b>	4
<b>RPM</b>	1500 Rmp

Tabela 10 - Características da máquina em estudo.

## 8 Descrição da componente estrutural

O projeto é constituído por duas componentes estruturais sendo *Hardware* e *Software* com a junção das duas componentes é possível a obtenção de resultados viáveis.

### 8.1 Estrutura de Hardware (Estrutura Física)



*Figura 70 - Componente estrutural - Hardware*

## 8.2 Estrutura de Software (Programação Matlab)

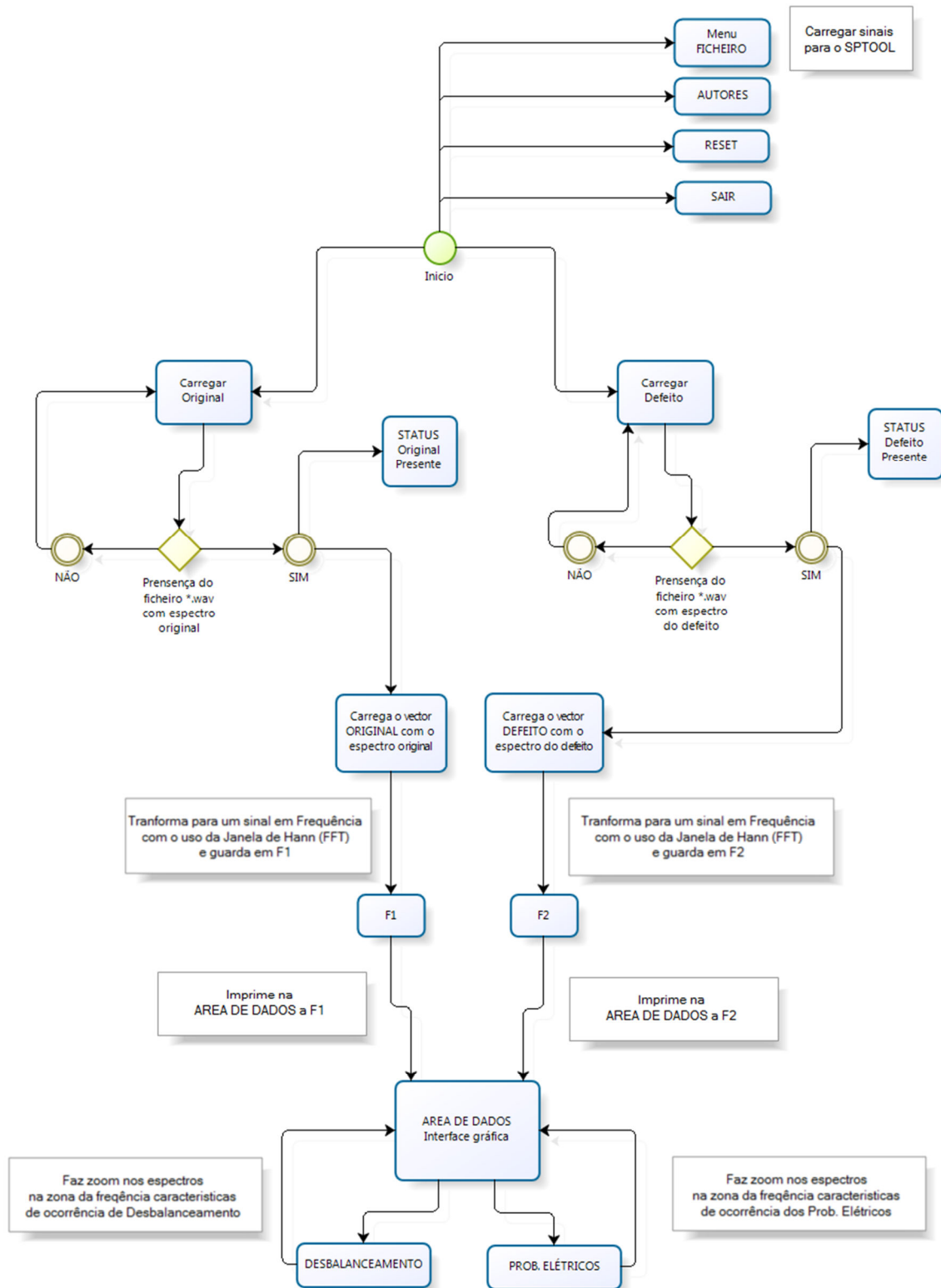


Figura 71 - Estrutura de Software.

## 9 Conclusões e Perspectivas Futuras

Os resultados obtidos são surpreendentes pela positiva e com muito potencial de desenvolvimento. O *Diagnóstico de Máquinas Elétricas pela Análise de Vibração* é válido e com melhoramentos pode ser realmente útil nas tarefas de manutenção.

### 9.1 Conclusões Sobre as Simulações

A aplicação dispõe de uma área para análise onde permite verificar os níveis de vibração de cada simulação. Consiste em fazer *zoom* nas zonas onde teoricamente se encontram os problemas, para o problema de desbalanceamento 1xRPM, para os problemas elétricos 1,2 x Frequência Nominal da Rede (em Portugal 50Hz). Verifica-se que realmente às frequências identificadas existe um disparo de amplitude do sinal de defeito sobre a assinatura espectral. Na eventualidade de sobreposição dos sinais nas frequências características indica a ausência desse defeito. Os picos ocorrem com pequenos desvios dos níveis teóricos.

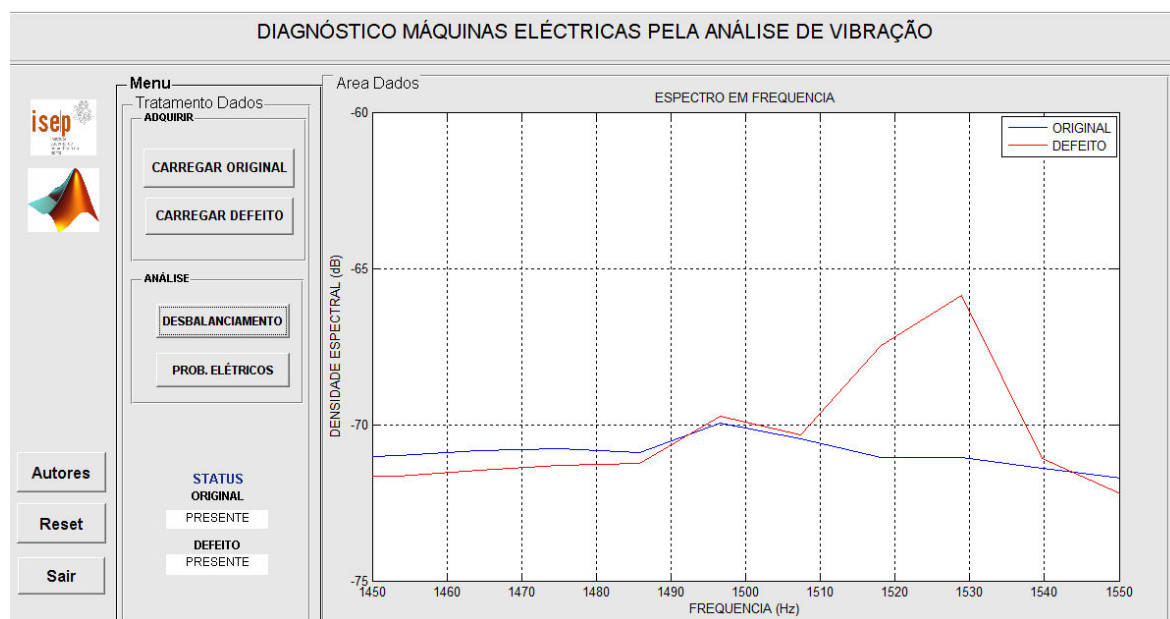


Figura 72 - Verificação dos resultados na simulação do defeito de desbalanceamento.

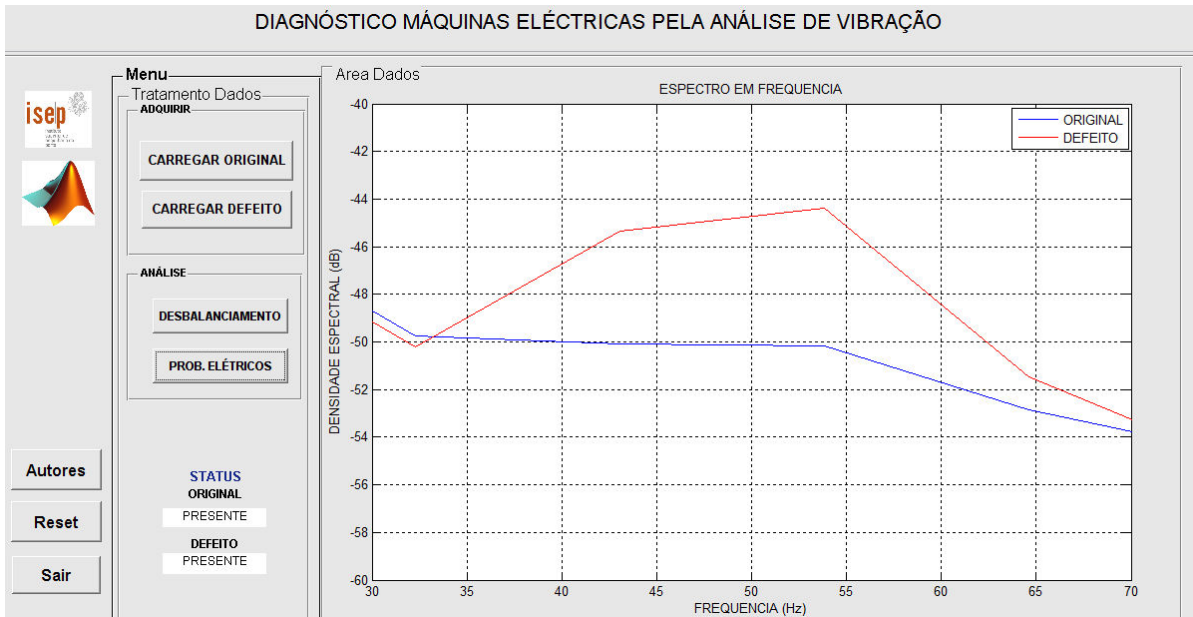


Figura 73 - Verificação dos resultados na simulação do defeito problemas eléctricos.

## 9.2 Limitações

- Permite apenas a diagnóstico de 2 defeitos
- Só efetua leituras para diagnóstico sobre um eixo
- Não recorre a mais nenhum sensor para aferir os resultados

## 9.3 Trabalho futuro

### 9.3.1 Leitura nos 3 Eixos

As leituras realizadas apenas sobre um eixo são limitadoras no tipo de ensaios que pretendemos efetuar, mas com a aquisição de algum acelerómetro de 3 eixos como o que se pode visualizar na Figura 74 juntamente com um tacómetro, seria possível desenvolver a aplicação alargando a gama de ensaios. O acelerómetro da Figura 74 ronda os 200€ para a aquisição em Portugal.



Figura 74 – Acelerómetro triaxial 8102A da MEAS – Measurement Specialities.

### 9.3.2 Caixa de Acoplamento

Para uma solução global perfeita é necessário a construção de uma caixa de encapsulamento para o sensor utilizado, de forma ao projeto ser portátil e versátil. Depois da definição do sensor deve ser construída uma caixa de encapsulamento para o mesmo á semelhança da construída para o sensor SDT1-028K. A mesma deve procurar ser o mais versátil possível no sentido de ser possível a sua utilização em qualquer máquina, deve ser construída para não ser uma massa prejudicial á vibração da máquina, a caixa construída foi em inox mas existem ligas mais leves como é o caso do alumínio, os suportes da caixa ao chassi, na caixa construída também apresentam um massa que pode ser reduzida significativamente. Ao eliminar alguns parafusos da primeira versão também é possível reduzir o seu peso.

### 9.3.3 Alimentação USB Caso Necessário

Grande parte dos acelerómetros triaxiais necessitam de alimentação de excitação. Para uma maior portabilidade e caso os níveis necessários assim o permitam, podem ser criadas alimentações para a excitação dos acelerómetros, geralmente em corrente e níveis de tensão baixos, através das portas USB que disponibilizam 5V.

### 9.3.4 Formato *\*.wma* ou *\*.wav*

A aplicação foi elaborada para aceitar ficheiros com extensão *\*.wav* mas como os sistemas operativos mais recentes gravam em formatos de extensão *\*.wma* que não é mais que o formato *\*.wav* mas mais compacto, deve ser estudada a possibilidade de em versão de *Matlab* mais recentes (a utilizada foi a versão 7) serem adotadas as extensões de ficheiros *\*.wav*.

### 9.3.5 Melhoramento da Aplicação

Toda a aplicação pode ser otimizada, pois pode incorporar uma análise de todos os defeitos e não resumir-se apenas a 2, pode ser convertida para um ficheiro *\*.exe* de forma a não ser necessário a presença do *Matlab*.

Poder ser otimizada de outra forma permitindo introduzir as características da máquina para um diagnóstico correto e assertivo.

## 9.4 Apreciação final

Com o projeto constatou-se a grande potencialidade que os sensores de vibração e acelerómetros possibilitam.

A placa de som surpreendeu, ao ser um elemento tão comum e presente em todos os computadores, tem potencialidades á primeira vista desconhecidas que podem ser aproveitadas utilmente, podendo funcionar como uma placa de aquisição de dados, barata e acessível.

A análise espectral demonstrou-se uma técnica muito útil e eficaz, permitindo comparar a assinatura espectral de cada máquina com as assinaturas dos defeitos, assim como a FFT que permite a passagem de sinal no tempo para um sinal em frequência.

O *Matlab* apresentou-se como uma ferramenta muito versátil, permite recorrendo às suas potencialidades e *toolbox's* dar solução a quase tudo no tratamento e processamento de sinais.

O projeto mesmo com o contratempo de saturação do sensor decorreu como esperava, atingi o objetivo criando e inovando um novo sistema de diagnóstico de máquinas elétricas pela análise de vibração.

## 10 Bibliografia

- 1, D. (sd).** Capítulo 7 - Análise e Diagnóstico de Vibrações. In Mecânica das Vibrações. Cinemática e Dinâmica das Máquinas (2008).
- Abreu, O., & ProvibTech. (2012).** Obtido em 14 de abril de 2012, de [www.abreueoliveira.com.br/Provibtech/portifolio.pdf](http://www.abreueoliveira.com.br/Provibtech/portifolio.pdf).
- AEP, A. E. (2003).** Manual Pedagógico PRONACI. Porto.
- Beneditti, J. A. (2002).** Manutenção Centrada em Confiabilidade e Análise de Vibração. Porto Alegre.
- Bonadiman, M. (s/d).** Projecto de Manutenção Preditiva (Gatec). Obtido em Agosto de 2012, de <http://www.gatec.com.br/Palestras%20Evento%20Maring%E1/Marcos%20Bonadiman%20-%20Apres%20analise%20de%20vibracoes.pdf>.
- Bruel & Kjaer. (1982).** Measuring Vibration.
- Confiabilidade - Manutenção Preditiva, L. (s.d).** Análise de Vibração. Santa Teresinha - Paulínia, São Paulo, Brasil.
- Martins, P. V. (2010).** Utilização de microfones comuns para detecção de defeitos em máquinas de pequeno porte. Salvador: Universidade Salvador.
- MEAS, M. S. (2012).** Vibration Sensors.
- MRA, I. S. (2012).** Transdutores de Acústica e Vibrações. Lisboa.
- Murasugi, M. T. (2003).** Biblioteca de Aquisição de Dados. Universidade Braz Cubas.
- Murty, A. &. (1995).** Availability and maintenance cost optimization of a production plant. Cambridge: International Journal of Quality & Reliability Management.
- Ometron Ltd. (Agosto de 2012).** Optical Measurement Solutions. Obtido de <http://www.ometron.com>
- Piccoli, D. H. (s/d).** Apostila de Mecânica das Vibrações. Análise e Diagnóstico de Vibrações, 7. Rio Grande: FURG.
- QEnergia. (2012).** Introdução à Vibração.

**Sampaio, C. (2004).** Conceitos Básicos de Vibração. Escola Náutica I.D.Henrique.

**Soledade, G. L. (2006).** KRON Instrumentos Elétricos. Obtido em 04 de 07 de 2011, de <http://www.kron.com.br/>

**Teknikao, I. e. (2012).** Medida de Vibração - Uma Ferramenta Para a Manutenção. São Paulo.

**Vibração, G. -A. (2012).** Obtido de <http://www.grom.com.br>

**Vittorino, M. A. (2008).** Manutenção Preditiva.

**WEG, E. E.-M. (2012).** Diagnóstico de problemas em máquinas elétricas girantes através da medição e da análise do espectro de vibração mecânica. Departamento de P&D do Produto.

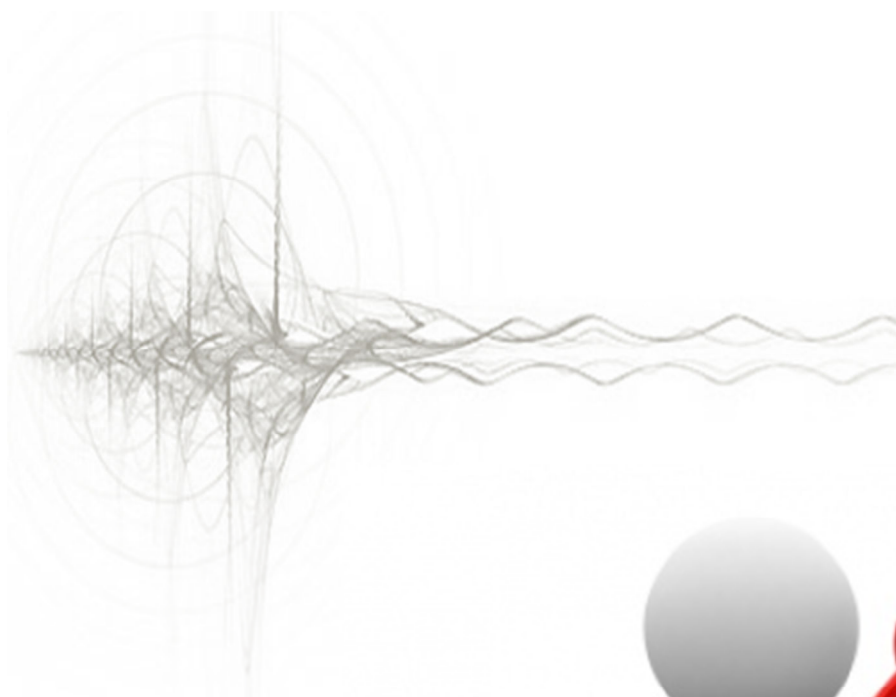
## **ANEXO I – Guia de Utilizador**



# **GUIA DE UTILIZADOR**

## **DIAGNÓSTICO MÁQUINAS ELÉTRICAS**

### **Pela Análise da Vibração**



## 1. Apresentação do Software

Na Figura 75, encontra-se o *Layout* do programa de diagnóstico de máquinas elétricas, com este podemos carregar a assinatura espectral da máquina assim como o espectro do defeito e comparar as duas.

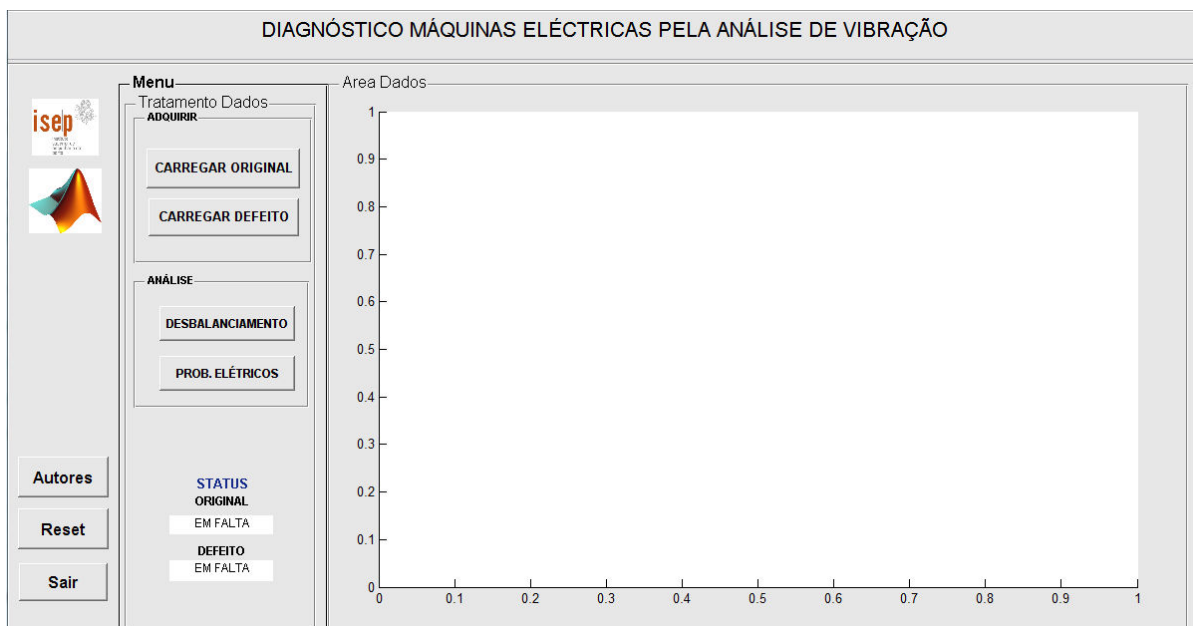


Figura 75 - Janela da Aplicação "Diagnóstico Máquinas Elétricas Pela Análise de Vibração"

## 2. Carregar Original

A partir da janela principal podemos iniciar a análise, pressionando o botão CARREGAR ORIGINAL e carregando numa primeira fase o ficheiro \*.wav com a assinatura espectral da máquina (ficheiro original), após a sua importação o STATUS ORIGINAL irá mudar o seu estado de "EM FALTA" para "PRESENTE" identificando que foi carregado e encontra-se disponível para análise, como evidenciado na Figura 76, o espectro passa a ser visível na janela ÁREA DE DADOS.

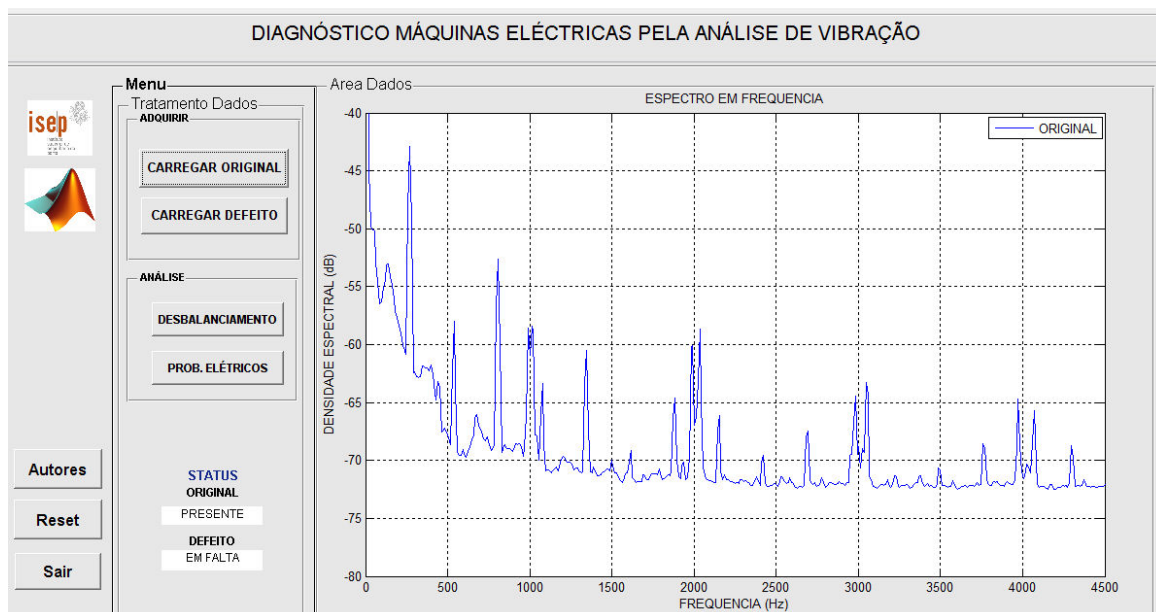


Figura 76 - Ficheiro original carregado e sua apresentação.

### 3. Carregar Defeito

Numa fase posterior podemos pressionar o botão CARREGAR DEFEITO para assim carregar o ficheiro \*.wav correspondente ao espectro do defeito a analisar. Após a sua importação o STATUS DEFEITO irá mudar o seu estado de "EM FALTA" para "PRESENTE" identificando que foi carregado e encontra-se disponível para análise, como evidenciado na Figura 77, o espectro passa a ser visível na janela ÁREA DE DADOS sobreposto ao espectro original.

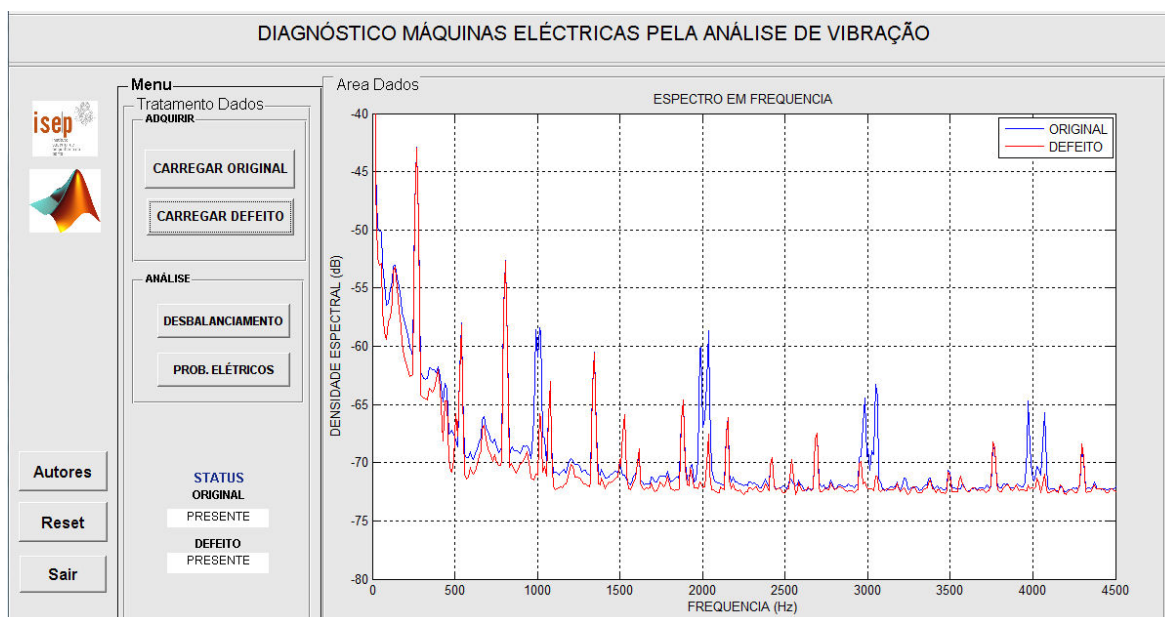


Figura 77 - Ficheiro com defeito carregado e sua apresentação.

#### 4. Desbalanceamento e Problemas Eléctricos

Através dos botões DESBALANCEAMENTO e PROB. ELÉTRICOS podemos aplicar *zoom* nos espectros e nas frequências correspondentes a cada defeito e visualizar a sobreposição dos espectros anteriormente carregados. Ao se constatar uma sobreposição podemos concluir que não existe qualquer alteração e por sua vez o problema da máquina é um outro defeito qualquer e não o defeito selecionado, a não sobreposição evidencia o defeito.

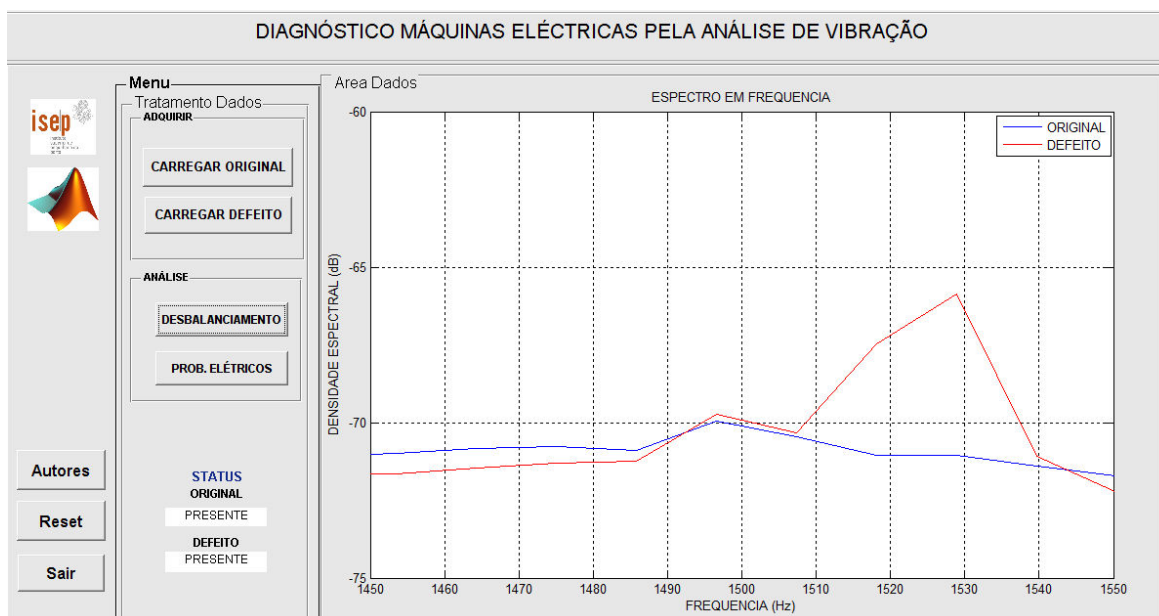


Figura 79 - Defeito de desbalanceamento após pressionar o botão DESBALANCEAMENTO.

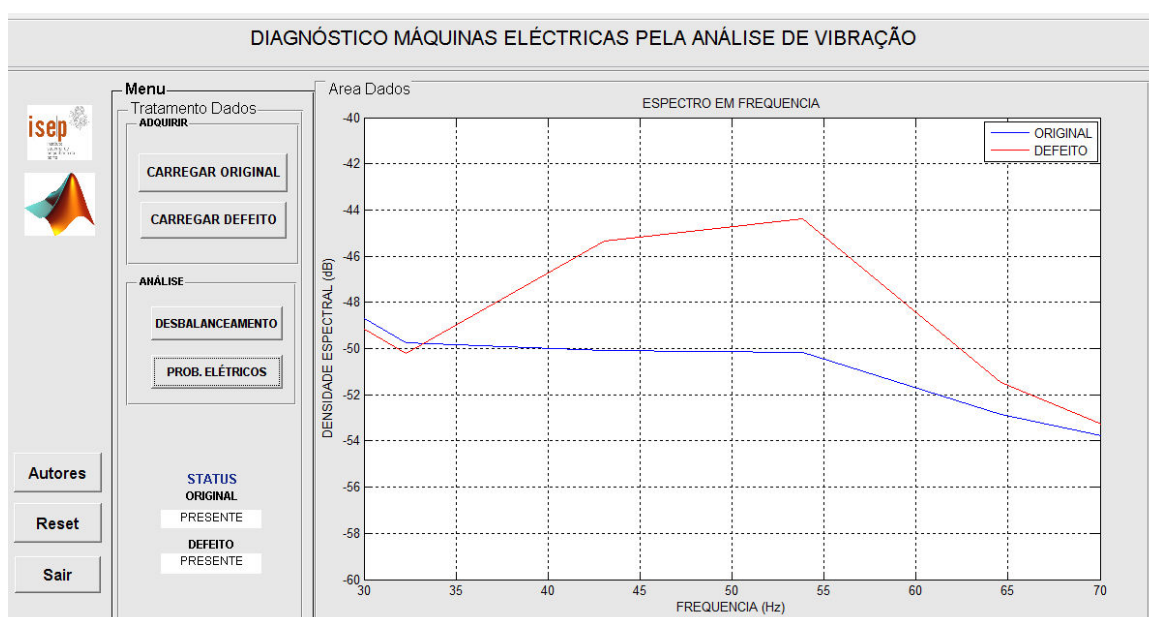


Figura 78 - Defeito de problemas eléctricos após pressionar o botão PROB. ELÉTRICOS.

## 5. Envio de Sinais para *SPTOOL*

Para além das ferramentas referidas o programa encontra-se dotado de mais uma ferramenta com um grande potencialidade, permitindo efetuar o mesmo tipo de análise mas aplicando outros métodos matemáticos ou filtros utilizados indicados para processamento de sinal, a ferramenta denominada *sptool*, como poderá constatar mais á frente. Recorrendo ao menu FICHEIRO, poderá proceder ao envio dos ficheiros adquiridos para o *sptool* que possibilita a visualização do sinal no tempo e em diferentes espectros através de vários métodos para além do aplicado no *Diagnóstico Máquinas Elétricas pela Análise de Vibração*, como se pode verificar nas figuras seguintes.



Figura 80 - Envio de dados para "SPTOOL".

## 6. Visualizar no Tempo

Poderá visualizar o sinal no tempo, após ter carregado os ficheiros, ou seguir os passos representados na Figura 81, Selecionar em *Signals* o ficheiro pretendido e carregar em VIEW, obterá a janela da Figura 82, obtendo um resultado semelhante.

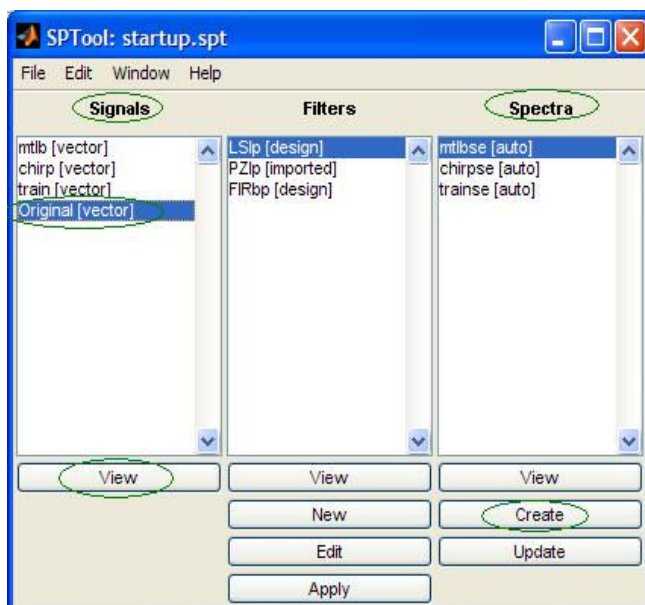


Figura 81- Modo visualizar sinal tempo e criar sinal espectral.

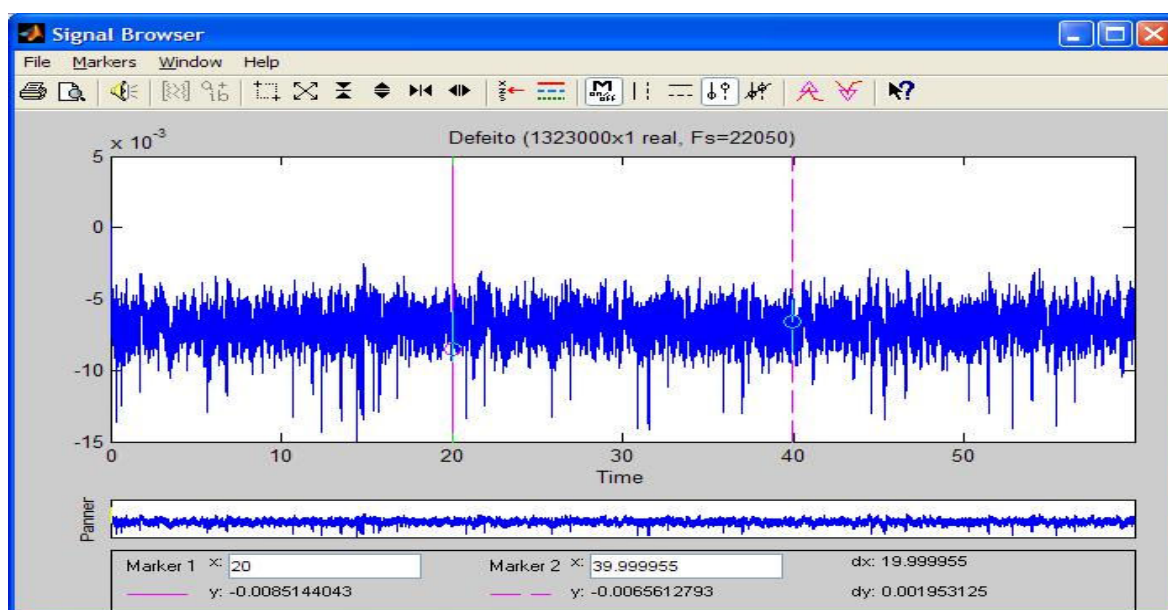


Figura 82 - Sinal obtido em função do tempo no ficheiro defeito.

A partir da área *Spectra* da Figura 81 poderá obter o sinal espectral através de diferentes métodos de análise, seguindo os seguintes passos: Seleccionar ficheiro a analisar e clicar em CREATE, ao clicar neste obterá janela da Figura 84, em *method* deverá escolher o tipo de método a utilizar, de seguida clicar em APPLY para proceder á conversão do sinal no tempo para um sinal em frequência.

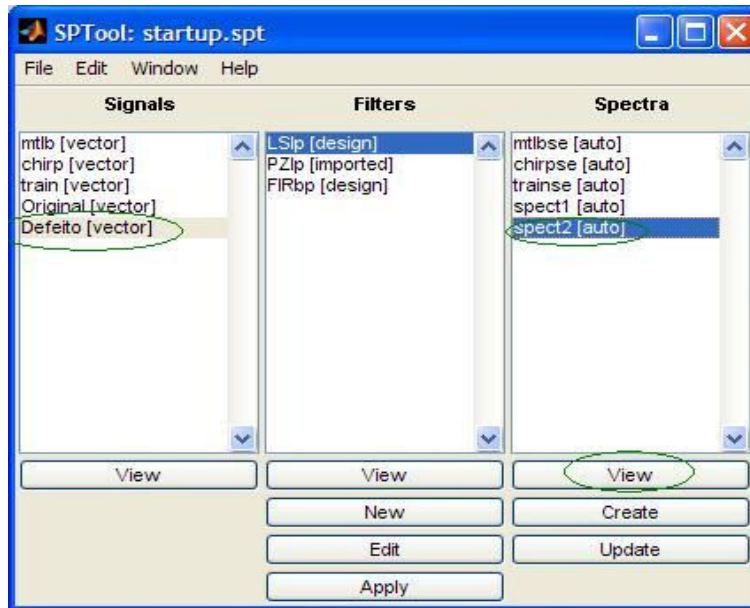


Figura 83 - Modo visualizar sinal tempo e criar sinal espectral.

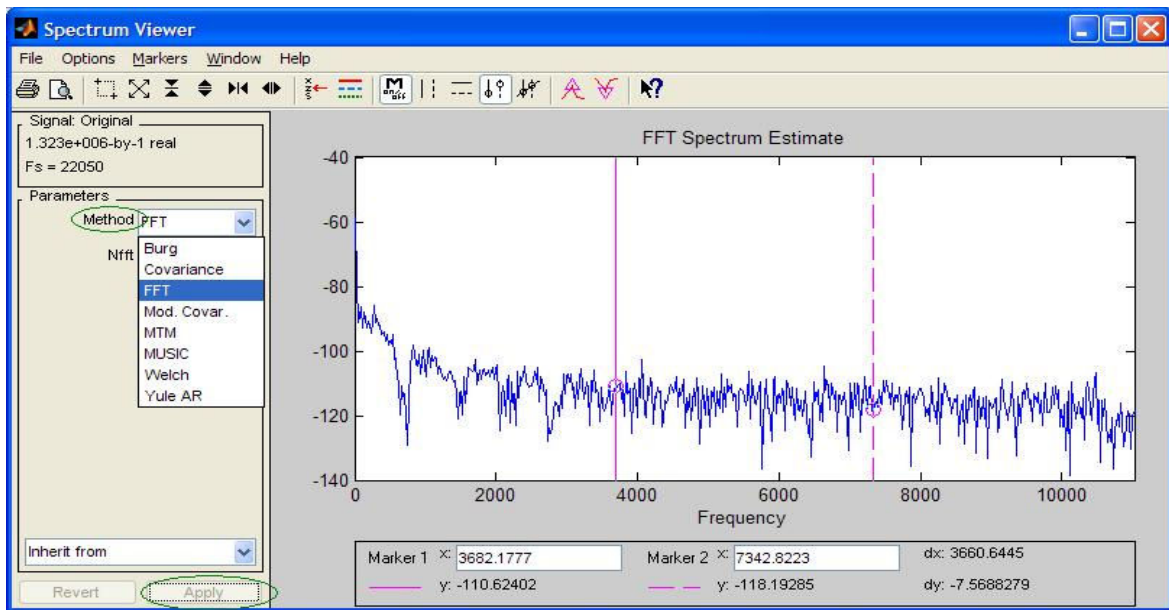


Figura 84 - Sinal original transformado em sinal de frequência usando FFT.

Esta ferramenta possibilita também a visualização dos dois sinais em simultâneo como referenciado na Figura 85, para obter as duas termos que seguir aos seguintes passos: Seleccionar os dois espectros em "Spectra" e depois clicar em VIEW, para efetuar uma distinção entre eles poderá recorrer a barra de menus escolhendo o botão LINES PROPERTIES.

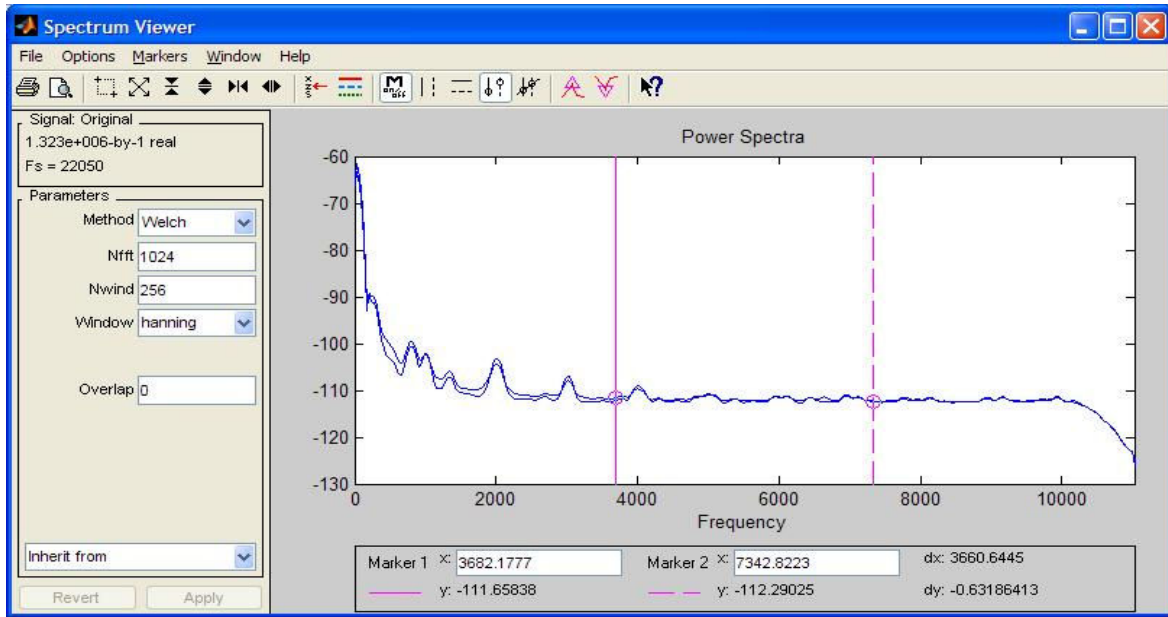


Figura 85 - Dois sinais em simultâneo no "SPTOOL".

## 7. Botões Auxiliares

A aplicação dispõe ainda de botões auxiliares de interface com o utilizador como:

- Botão AUTORES – permite a visualização dos autores da aplicação;
- Botão RESET – permite o *reset* da aplicação;
- Botão SAIR – permite sair da aplicação e fechar o *matlab*.

## **ANEXO II - Código Matlab**



## 1. Programação da Aplicação em Matlab

```

function varargout = Projecto(varargin)
% PROJECTO M-file for Projecto.fig
% PROJECTO, by itself, creates a new PROJECTO or raises the existing
% singleton*.
% H = PROJECTO returns the handle to a new PROJECTO or the handle to
% the existing singleton*.
% PROJECTO('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% function named CALLBACK in PROJECTO.M with the given input arguments.
% PROJECTO('Property','Value',...) creates a new PROJECTO or raises the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
% applied to the GUI before Projecto_OpeningFcn gets called. An
% unrecognized property name or invalid value makes property application
% stop. All inputs are passed to Projecto_OpeningFcn via varargin.
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help Projecto
% Last Modified by GUIDE v2.5 03-Nov-2012 12:50:42
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Projecto_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Projecto_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before Projecto is made visible.
function Projecto_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Projecto (see VARARGIN)
% Choose default command line output for Projecto
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

```

```
% UIWAIT makes Projecto wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Projecto_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
%%

%CARREGAR IMAGEM MATLAB;
logo_matlab = imread('MATLAB.jpg');
axes(handles.axes2);
imshow(logo_matlab);

logo_isep = imread('ISEP.jpg');
axes(handles.axes3);
imshow(logo_isep);

%%
%CRIAR BARRA DE MENUS (FICHEIRO, PARAMETROS);

%CRIAR MENU FICHEIRO;
function FICHEIRO_Callback(hObject, eventdata, handles)

%SUB-MENU ORIGINAL;
function ORIGINAL_Callback(hObject, eventdata, handles)

%CARREGAR FICHEIRO COM ESPECTRO ORIGINAL PARA SPTOOL;
function Untitled_1_Callback(hObject, eventdata, handles)

[original, pathname] = uigetfile('*.wav');%CARREGA FICHEIRO ORIGINAL PARA
MATLAB;

file_path=fullfile(pathname, original);

if isequal(original,0)
    disp('Utilizador escolheu Cancelar')
else
    disp(['Escolha Utilizador: CARREGADO ']);
end

[data1, Fs1]=wavread(file_path); %Efectua a leitura do ficheiro de audio para o vector;
try
    sptool('load','Signal',data1,Fs1,'Original');
catch
```

```

    errordlg('Failed sending acquired data to SPTool','Error','Modal');
end

%SUB-MENU DEFEITO;
function DEFEITO_Callback(hObject, eventdata, handles)

%CARREGAR FICHEIRO COM DEFEITO PARA SPTOOL;
function Untitled_2_Callback(hObject, eventdata, handles)

[defeito, pathname] = uigetfile('*.wav');%CARREGA FICHEIRO ORIGINAL PARA
MATLAB;

file_path=fullfile(pathname, defeito);

if isequal(defeito,0)
    disp('Utilizador escolheu Cancelar')
else
    disp(['Escolha Utilizador: CARREGADO ', ])
end

[data2, Fs2]=wavread(file_path); %Efectua a leitura do ficheiro de audio para o vector;
try
    sptool('load','Signal',data2,Fs2,'Defeito');
catch
    errordlg('Failed sending acquired data to SPTool','Error','Modal');
end
% -----

%CRIAR MENU PARAMETROS;
function PARAMETROS_Callback(hObject, eventdata, handles)

%CRIAR MENU CONFIGURAR;
function CONFIGURAR_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to CONFIGURAR (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% -----
function DESBALANCEAMENTO_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to DESBALANCEAMENTO (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
prompt = {'F1:','F2:'};
dlg_title = 'DESBALANCEAMENTO';
num_lines = 1;
def = {'1500','1600'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
b=str2double(answer);
handles.d11=b(1,1);

```

```

handles.d21=b(2,1);
guidata(hObject,handles);
%

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles,dados)
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%----BOTAO DESBALANCEAMENTO;
get(gcf,'CurrentAxes'); %apaga conteudo plotado no janela grafica;

axes(handles.axes1);
axis([0 5 0 5]);

plot(handles.F1,handles.mag1,'b',handles.F2,handles.mag2,'r');

set(handles.axes1,'XLim',[1450 1550]);
set(handles.axes1,'YLim',[-75 -60]);
grid on;
title('ESPECTRO EM FREQUENCIA');
xlabel('FREQUENCIA (Hz)');
ylabel('DENSIDADE ESPECTRAL (dB)');
legend('ORIGINAL','DEFEITO');
%%
% -----
function PROB_ELETRICOS_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to PROB_ELETRICOS (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
prompt = {'F1:','F2:'};
dlg_title = 'PROBLEMAS ELECTRICOS';
num_lines = 1;
def = {'30','70'};
answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
c=str2double(answer);
handles.d31=c(1,1);
handles.d32=c(2,1);
guidata(hObject,handles);
% -----

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%----BOTAO PROBLEMAS ELETRICOS;
get(gcf,'CurrentAxes'); %apaga conteudo plotado no janela grafica;

```

```

axes(handles.axes1);
axis([0 5 0 5]);

plot(handles.F1,handles.mag1,'b',handles.F2,handles.mag2,'r');

set(handles.axes1,'XLim',[30 70]);
set(handles.axes1,'YLim',[-60 -40]);
grid on;
title('ESPECTRO EM FREQUENCIA');
xlabel('FREQUENCIA (Hz)');
ylabel('DENSIDADE ESPECTRAL (dB)');
legend('ORIGINAL','DEFEITO');

%%
%CARREGAR FICHEIRO ORIGINAL PARA MATLAB

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
%-----
%----BOTAO CARREGAR DADOS;
get(gcf,'CurrentAxes'); %apaga conteudo plotado no janela grafica;
%CARREGAR FICHEIRO C\ DADOS MOTOR DEFEITO;

[original, pathname] = uigetfile('*.wav');%CARREGA FICHEIRO ORIGINAL PARA
MATLAB;

file_path=fullfile(pathname, original);

if isequal(original,0)
    disp('Escolha Utilizador: Cancelar')
else
    disp(['Escolha Utilizador: Carregar ', ]);
    ESTADO1='PRESENTE'
end

[data1, Fs1]=wavread(file_path); %Efectua a leitura do ficheiro de audio para o vector;

%Calcula a densidade do Espectro
hann_wind = round(2048*0.8);
[Px1,F1] = psd(data1,2048,Fs1,[],hann_wind); % Densidade Espectral do sinal entrada
(aplicando a janela de Hann;
mag1=10*log10(Px1);

handles.estado1=ESTADO1;
handles.F1=F1;
handles.mag1=mag1;

```

```

guidata(hObject,handles);
set(handles.estado_original,'STRING',handles.estado1); % Altera o estado do ficheiro original
%-----
axes(handles.axes1);
axis([0 5 0 5]);

plot(F1,mag1,'b');

set(handles.axes1,'XLim',[0 4500]);
set(handles.axes1,'YLim',[-80 -40]);
grid on;
title('ESPECTRO EM FREQUENCIA');
xlabel('FREQUENCIA (Hz)');
ylabel('DENSIDADE ESPECTRAL (dB)');
legend('ORIGINAL','DEFEITO');
hold on;

%%
%%CARREGAR FICHEIRO COM DEFEITO
% --- Executes on button press in pushbutton11.
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

%----BOTAO ANALISE OFFLINE;
%ABRIR FICHEIRO COM DADOS DEFEITO;
get(gcf,'CurrentAxes'); %apaga conteudo plotado no janela grafica;
%CARREGAR FICHEIRO C\ DADOS MOTOR DEFEITO;

[defeito, pathname] = uigetfile('*.wav');%CARREGA FICHEIRO ORIGINAL PARA
MATLAB;

file_path=fullfile(pathname, defeito);

if isequal(defeito,0)
    disp('Escolha Utilizador: Cancelar');
else
    disp(['Escolha Utilizador:CARREGADO ']);
    ESTADO2='PRESENTE';
end
handles.estado2=ESTADO2;
guidata(hObject,handles);
[data2, Fs2]=wavread(file_path); %Efectua a leitura do ficheiro de audio para o vector;
set(handles.estado_defeito,'STRING',handles.estado2); % Altera o estado do ficheiro com
defeito

%Calcula a densidade do Espectro
hann_wind = round(2048*0.8);

```

```

[Px2,F2] = psd(data2,2048,Fs2,[],hann_wind); % Densidade Espectral do sinal entrada
(aplicando a janela de Hann);
mag2=10*log10(Px2);
handles.F2=F2;
guidata(hObject,handles);
handles.mag2=mag2;
guidata(hObject,handles);
%-----
axes(handles.axes1);
axis([0 5 0 5]);

plot(F2,mag2,'r');

set(handles.axes1,'XLim',[0 4500]);
set(handles.axes1,'YLim',[-80 -40]);
grid on;
title('ESPECTRO EM FREQUENCIA');
xlabel('FREQUENCIA (Hz)');
ylabel('DENSIDADE ESPECTRAL (dB)');
legend('ORIGINAL','DEFEITO');

%%

% BOTAO AUTORES;
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Mostra na janela o ficheiro de imagem composto pelos autores Projecto;
clc;
figure
autores = imread('Autores.jpg');
imshow(autores);

%%

% BOTAO SAIR;
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)

quit; %Interrompe o programa;

%%

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function uipanel18_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to uipanel18 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function pushbutton3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% -----
function PROB_ELETRICOS_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to PROB_ELETRICOS (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

get(gcf,'CurrentAxes'); %apaga conteudo plotado no janela grafica;

axes(handles.axes1);
axis([0 5 0 5]);

clf (axes1) ;

clear all;
path(pathdef);

clc;
%%
```