



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

César Manuel Gonçalves Fernandes

**Aplicação de técnicas de manutenção  
preditiva aos equipamentos de uma  
central hidroeléctrica**

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação de

**Professor Doutor José Meireles**  
**Engenheiro José Carvalho Magalhães (EDP)**



À Universidade do Minho e EDP.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os intervenientes.

A todos, o meu sincero muito obrigado.



## RESUMO

A manutenção das centrais hidroeléctricas tem assumido uma posição estratégica em busca de melhores desempenhos e alargamento dos períodos de indisponibilidade destas. Os custos associados a uma indisponibilidade de uma central são avultados, fruto do mercado competitivo e da dimensão das operações de manutenção pelo que a antecipação à falha e um planeamento exaustivo poderão beneficiar os resultados financeiros das organizações.

A manutenção preditiva tem, portanto, ganho algum destaque na gestão estratégica destas grandes organizações. Várias técnicas preditivas têm sido estudadas e aplicadas nas centrais hidroeléctricas entre as quais e destaca a análise de vibrações partindo de sistemas de monitorização instalados permanentemente nos grupos geradores.

Neste presente trabalho, realizado em ambiente empresarial numa empresa de produção de energia eléctrica – EDP Gestão da Produção de Energia, S.A. – em particular no Centro de Produção Cávado-Lima, recorrendo a fonte hídrica, foram abordados os vários sistemas de monitorização e protecção de vibrações das várias centrais. No decurso do trabalho foram encontrados problemas associados aos equipamentos instalados, analisadas as suas consequências e propostas algumas melhorias com vista à sua melhor utilização.

Baseado na literatura e na análise do equipamento instalado na central hidroeléctrica – Central de Caniçada - verificou-se que o sistema de monitorização de vibrações é insuficientes para a implementação de uma filosofia de manutenção preditiva o que resultou no aprofundamento da análise do sistema e consequente proposta de redesign do sistema de monitorização de vibrações com vista a alcançar uma filosofia de manutenção preditiva.

Durante o decorrer do trabalho de dissertação realizaram-se, também, ensaios de vibração na central hidroeléctrica do Alto Rabagão, obtendo-se resultados que corroboram a ideia de aumento da eficiência de manutenção preditiva através de análise de vibrações. Os resultados são apresentados e discutidos com base na legislação associada, especialmente relativamente à análise dos espectros de frequência.

Por último, salienta-se que o desenvolver deste trabalho resultou numa iniciativa de melhoria denominada de “Optimização da operacionalidade dos sistemas de monitorização de vibrações (SMV)” que integra as iniciativas Lean do Centro de Produção Cávado-Lima do programa Lean EDP Way do Grupo EDP.

## PALAVRAS-CHAVE

Centrais hidroeléctricas, manutenção preditiva, sistemas de monitorização de vibração.





## ABSTRACT

The maintenance of hydropower plants has taken a strategic position in search of better performance and extend its operational long-term without restrictions. The costs associated with an outage of a hydro power plant are very high and, due to the competitive market and the dimension of the maintenance, the anticipation of failure and extensive maintenance planning can increase the organization profits.

Predictive maintenance has therefore gained some prominence in this matter. Several predictive techniques have been studied and applied in hydropower plants. However, vibration analysis stands the more used. Vibration monitoring systems installed in generator sets are used for that.

In this present work, contextualized in an industrial environment at EDP were studied the various vibration monitoring and protection systems of several plants. Alongside of this approach, problems were found associated with equipment installed which resulted in their analysis and proposals for improvement.

Based on the literature review and the study equipment installed in a particular hydropower plant - Caniçada hydropower plant - it was found that the vibration monitoring system is insufficient for implementing a predictive maintenance philosophy which resulted in the most comprehensive study of the system and proposed redesign of system to achieve a philosophy of predictive maintenance.

During the internship at EDP were also made vibration tests at a hydropower plant - Alto Rabagão - those results support the idea of efficient predictive maintenance using vibration analysis. The results are presented and discussed based on theoretical grounds, especially regarding the analysis of the frequency spectra.

Finally, it is noted that the development of this work resulted in an improvement initiative denominated "Optimization of operability of vibration monitoring systems" that integrates Lean initiatives of Cávado-Lima Production Center by the Program Lean EDP Way of EDP Group.

## KEYWORDS

Hydropower plants, predictive maintenance, vibration monitoring systems.



## ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Palavras-Chave.....	vii
Abstract.....	ix
Keywords.....	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras.....	xv
Lista de tabelas.....	xvii
Lista de siglas e símbolos.....	xix
Parte I – Introdução.....	1
1. Introdução.....	3
2. Os recursos hídricos e o seu aproveitamento pela EDP.....	5
3. Motivação.....	6
4. Objectivos e estrutura da dissertação.....	7
Parte II – Estado da Arte.....	9
1. Introdução.....	11
2. Manutenção preditiva.....	11
3. As centrais hidroelétricas e a manutenção preditiva.....	16
4. Sistema de manutenção do Centro de Produção Cávado-Lima.....	19
4.1. Manutenção preditiva no Centro de Produção Cávado-Lima.....	22
Parte III – Fundamentos Teóricos.....	25
1. Introdução.....	27
2. Análise de vibrações.....	27
2.1. Vibração lateral (LRV).....	31
2.2. Vibração torsional (TRV).....	32
3. Análise de vibrações em grupos geradores hídricos.....	34
4. Normas.....	36

4.1. ISO 7919-5 .....	36
4.2. ISO 10816-5 .....	38
5. Falhas comuns em grupos geradores hídricos. Descrição e Diagnóstico. ....	40
5.1. Desequilíbrio de massas rotativas.....	41
5.2. Desalinhamento .....	43
5.3. Defeitos nas chumaceiras .....	45
5.4. Cavitação.....	48
 Parte IV – Aplicação .....	 49
1. Introdução.....	51
2. Caracterização dos grupos geradores da central de Caniçada .....	51
2.1. Acoplamentos principais.....	53
2.1.1. Turbina – veio inferior.....	54
2.1.2. Veio inferior – veio superior.....	54
2.1.3. Veio superior – jante do rotor.....	54
2.1.4. Veio superior – <i>manchon</i> /lentilha .....	55
3. Implementação de manutenção preditiva, através de análise de vibração, na central de Caniçada .	56
3.1. Caracterização do sistema de monitorização e protecção de vibrações da central de Caniçada..	57
3.1.1. Localização dos sensores de proximidade e acelerómetros no grupo gerador.....	58
3.1.2. Detecção de ocorrência de perigo .....	60
3.1.3. Discussão.....	60
3.2. Redesign do sistema de monitorização e protecção de vibrações da central de Caniçada .....	61
3.3. Combinação dos sistemas MPS e CMS.....	62
3.3.1. Combinação do sistema MPS e CMS no sistema de monitorização de vibrações da central de Caniçada .....	63
4. Monitorização e protecção de vibrações dos grupos geradores do centro de Produção Cávado-Lima	63
4.1. Caracterização do estado de funcionamento dos equipamentos de monitorização e protecção de vibrações, das centrais do Centro de Produção Cávado-Lima.....	64
4.2. Proposta de melhorias imediatas.....	66
5. Ensaio de vibrações.....	68
5.1. Equipamento de aquisição de dados e localização de sensores .....	69

5.2. Apresentação de resultados vibração (numéricos) .....	71
5.3. Apresentação de resultados vibração (gráficos) .....	72
5.3.1. Modo de funcionamento: gerador .....	74
5.3.2. Modo de funcionamento: bomba .....	77
6. Optimização da operacionalidade dos sistemas de monitorização de vibrações .....	80
6.1. Operacionalidade dos sistemas de monitorização de vibrações .....	82
6.2. Manutenção sistemática .....	82
6.3. Parametrização .....	83
6.4. Formação .....	83
6.5. Acesso remoto aos SMV .....	83
Parte V – Conclusões .....	85
1. Conclusões .....	87
2. Proposta de trabalhos futuros .....	88
Bibliografia .....	89
Apêndices .....	93
Apêndice I .....	95
Apêndice II .....	105
Apêndice III .....	109
Apêndice IV .....	111
Apêndice V .....	113
Apêndice VI .....	115
Apêndice VII .....	117
Apêndice VIII .....	119
Apêndice IX .....	121
Apêndice X .....	125
Apêndice XI .....	169
Apêndice XII .....	173



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Filosofias de manutenção.....	4
Figura 2 – Centros Produtores .....	6
Figura 3 – Ciclo de manutenção preditiva .....	14
Figura 4 – Curva da banheira .....	15
Figura 5 – Esquema de controlo. ....	17
Figura 6 – Controlo do grupo gerador .....	18
Figura 7 – Sistema vibratório .....	28
Figura 8 – Caracterização da excitação.....	28
Figura 9 – Transformada de Fourier em ilustração .....	31
Figura 10 – Ilustração de órbita em LRV .....	31
Figura 11 – Modelo mecânico LVR com 2 graus de liberdade.....	32
Figura 12 – Modelo mecânico de análise de torção de um sistema com 1 grau de liberdade .....	33
Figura 13 – Espectros .....	35
Figura 14 – Avaliação de vibração recomendada para deslocamento máximo.....	37
Figura 15 – Localização dos sensores para máquinas do grupo 3 .....	39
Figura 16 – Massa desbalanceada.....	41
Figura 17 – Espectro de frequência característico de desequilíbrio .....	42
Figura 18 – Desalinhamento angular .....	43
Figura 19 – Espectro de frequência característico de desalinhamento linear .....	44
Figura 20 – Desalinhamento de chumaceira .....	44
Figura 21 – Gráfico de valores de deslocamento .....	45
Figura 22 – Órbita .....	45
Figura 23 – Espectro de frequência característico de folgas excessivas em chumaceiras de deslizamento.....	46
Figura 24 – Espectro de frequência característico de <i>whirl oil</i> .....	47
Figura 25 – Ilustração do fenómeno <i>whirl oil</i> .....	47
Figura 26 – Órbita característica de <i>whirl oil</i> .....	47
Figura 27 – Grupo gerador J. M. Voith da central de Caniçada .....	52
Figura 28 – Esquema de grupo gerador da central de Caniçada.....	53
Figura 29 – Veio na zona de aparafusamento entre veios .....	54
Figura 30 –Acoplamento rotor-veio. ....	55

Figura 31 – Manchão e lentilha .....	56
Figura 32 – Fotografia do sistema de monitorização de vibrações.....	57
Figura 33 – Esquema de localização dos sensores/acelerómetros .....	59
Figura 34 – Fotografias da fixação .....	59
Figura 35 – Sala de máquinas da central do Alto Rabagão .....	68
Figura 36 – Equipamento portátil e computador portátil utilizados nos ensaios da central do Alto Rabagão.....	69
Figura 37 – Equipamentos utilizados durante os ensaios na central do Alto Rabagão.....	70
Figura 38 – Esquema de localização dos sensores e disposição dos equipamentos na central do Alto Rabagão.....	70
Figura 39 – Gráficos de vibração no domínio do tempo. ....	73
Figura 40 - Gráficos de vibração no domínio do tempo .....	74
Figura 41 – Espectros de frequência em funcionamento a 20MW.. ....	75
Figura 42 - Espectros de frequência em funcionamento a 20MW.....	75
Figura 43 - Gráficos de medição de ângulo de fase de vibração (alternador). ....	76
Figura 44 – Gráficos de medição de ângulo de fase de vibração (turbina). ....	77
Figura 45 - Espectros de frequência em funcionamento bomba. ....	78
Figura 46 - Espectros de frequência em funcionamento bomba. ....	78
Figura 47 - Gráficos de medição de ângulo de fase de vibração, alternador.....	79
Figura 48 - Gráficos de medição de ângulo de fase de vibração, guia da bomba. ....	79
Figura 49 - Gráficos de medição de ângulo de fase de vibração, turbina .....	80
Figura 50 – Ciclo objectivo da iniciativa.....	81



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicações/tecnologias para manutenção preditiva .....	14
Tabela 2 – Periodicidades de manutenção .....	21
Tabela 3 – Comparação entre LRV e TRV .....	34
Tabela 4 – Valores de vibração absoluta recomendados para máquinas verticais (operação entre 60 e 1800 rpm) .....	39
Tabela 5 – Causas de desequilíbrio.....	42
Tabela 6 – Componentes dos sistemas MPS e CMS.....	62
Tabela 7 – Características gerais das centrais em PRO .....	64
Tabela 8 – Características gerais dos SMV .....	65
Tabela 9 – Proposta de melhorias imediatas às centrais do rio Lima .....	66
Tabela 10 - Proposta de melhorias imediatas às centrais do rio Cávado.....	67
Tabela 11 – Resultados de medição de vibrações .....	71



## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

EDP	Energias de Portugal
PHCL	Produção Hídrica Cávado-Lima
CPCL	Centro de Produção Cávado-Lima
AL	Alto Lindoso
AR	Alto Rabagão
CD	Caniçada
FD	Frades
SD	Salamonde
TD	Touvedo
VF	Vilarinho das Furnas
VN	Vila Nova
PRE	Produção em regime especial
PRO	Produção em regime ordinário
PDM	Manutenção preditiva
MPS	Sistema de protecção de máquinas
CMS	Sistema de monitorização de condição
FFT	Fast Fourier Transform
rpm	Rotações por minuto
$c$	Constante de amortecimento
$k$	Constante de mola
$m$	Massa
$F$	Força excitadora
$x$	Deslocamento
$\dot{x}$	Velocidade
$\ddot{x}$	Aceleração
$\omega$	Velocidade angular
$X_0$	Posição máxima
$t$	Tempo



## PARTE I – INTRODUÇÃO



## 1. INTRODUÇÃO

Manutenção é a "combinação de todas as acções técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um objecto, com a finalidade de o manter ou restaurá-lo para um estado em que seja capaz de executar a função exigida." (NP EN 13306:2007).

No entanto, manutenção é muito mais complexa que a sua definição geral. O campo de aplicação define essa complexidade conforme a importância da manutenção de dado órgão ou equipamento, o custo e a tecnologia disponível para a manutenção. Este conjunto de parâmetros ditará a filosofia de manutenção adoptada.

Manutenção no campo de aplicação da engenharia mecânica é uma actividade de extrema importância pois é a responsável por grande parte dos custos de uma fábrica. Dependendo da indústria específica, os custos de manutenção podem representar entre 15 a 60% do custo dos bens produzidos. Como tal, a gestão da manutenção tem sido amplamente estudada de forma a reduzir estes custos com a aplicação das mais avançadas filosofias de fabricação e manutenção (Mobley, 2002).

As filosofias de manutenção podem ser divididas em 4 diferentes categorias:

- Manutenção Correctiva;
- Manutenção Preventiva;
- Manutenção Preditiva;
- Manutenção Proactiva.

Todas as filosofias de manutenção têm a sua importância e aplicação dependendo do objectivo final. As tecnologias aplicadas em cada uma delas aumentam exponencialmente sendo que a eficiência acompanha esse aumento. Aliada à eficiência está presente a qualidade que cada vez mais ganha extrema importância para o consumidor final e que uma boa filosofia de manutenção é capaz de colmatar essa falha. Seja em termos de qualidade do próprio produto ou em disponibilidade imediata do produto. Essa disponibilidade de produto é um dos grandes factores que levam um consumidor a optar por um ou outro fornecedor, factor concomitante à filosofia de manutenção implementada.

A manutenção correctiva permite que dado órgão funcione até à falha e sua reparação ou substituição apenas acontece imediatamente antes da paragem completa do equipamento. Este tipo de filosofia apenas deverá ser adoptada caso as paragens de equipamentos não afectam o funcionamento normal da empresa (Scheffer *et al*, 2004).

A manutenção preventiva adopta um sistema de agendamento de operações de manutenção (inspecções, ajustes, limpeza, lubrificação, substituição ou reparação) em intervalos de tempo que

podem ser baseados no calendário (dias, meses ou anos) ou em horas de funcionamento dos órgão/equipamentos (Scheffer *et al*, 2004).

A manutenção preditiva consiste no agendamento de manutenção apenas quando uma falha funcional é detectada. Consiste na monitorização constante dos parâmetros de funcionamento dos vários órgãos críticos e sujeitos a manutenção, aquando limites previamente estudados são alcançados, no momento mais conveniente (Scheffer *et al*, 2004).

A manutenção proactiva traça todas as falhas e procura a origem das mesmas. Todas essas falhas são estudadas proactivamente e corrigidas de forma a garantir a não repetição das mesmas. Nesta filosofia interliga-se a manutenção preventiva, preditiva e a análise de causa de origem de falha (RCFA) (Scheffer *et al*, 2004).

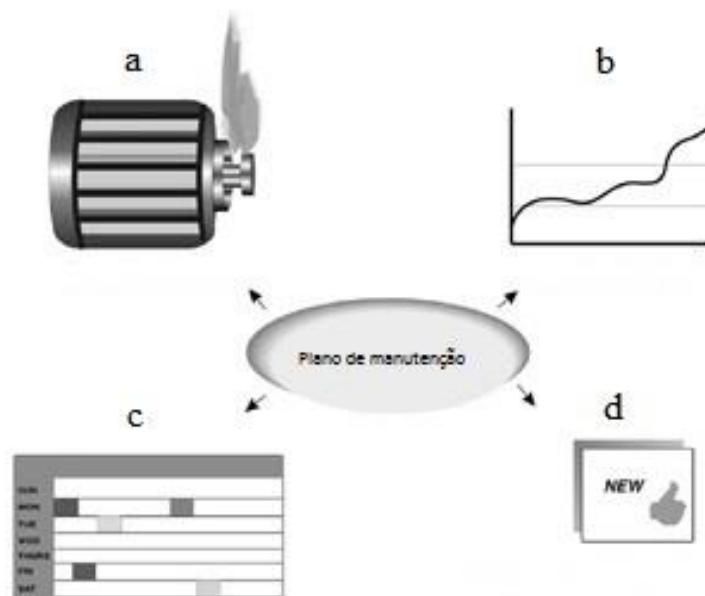


Figura 1 – Filosofias de manutenção. a) Manutenção correctiva; b) Manutenção preditiva; c) Manutenção preventiva; d) Manutenção proactiva (adaptado de Scheffer *et al*, 2004)

Assim, o caminho que a manutenção mecânica (Figura 1) tem trilhado é o de optimização total ficando a manutenção correctiva obsoleta para certos parâmetros de qualidade. A manutenção preventiva é talvez a filosofia mais aplicada na indústria sendo que a sua grande desvantagem é a precoce substituição de órgãos e/ou manutenção destes onde a manutenção preditiva tem conseguido actuar corrigindo esta lacuna e optimizando a manutenção à vida útil do órgão/equipamento. O objectivo final de qualquer empresa/indústria deverá ser alcançar uma filosofia proactiva de



manutenção para que todos os problemas/falhas sejam estudados exaustivamente de modo a eliminá-los.

Uma filosofia proactiva deverá ser adoptada aos outros níveis intrínsecos à indústria: ambiente, segurança, gestão humana, etc.

## 2. OS RECURSOS HÍDRICOS E O SEU APROVEITAMENTO PELA EDP

Os recursos hídricos para produção de energia eléctrica em Portugal são, maioritariamente, explorados pela EDP Gestão da Produção de Energia, S.A. (comumente designada de EDP Produção) que se insere no Grupo EDP – Energias de Portugal, S.A.

As outras fontes de energia, com ênfase para a eólica e térmica, são também fontes de energia exploradas pela EDP Produção.

A Direcção de Produção Hidráulica da EDP Produção é a responsável pela optimização da gestão da exploração dos recursos hídricos, assegurando assim a gestão do portfólio de activos hídricos que estão divididos pelos Centros de Produção. A cada Centro de Produção cabe assegurar a operacionalidade dos vários aproveitamentos hídricos e suas centrais associadas, garantir fiabilidade e assegurar normas de segurança e ambiente.

Os aproveitamentos hidroeléctricos da EDP Produção, Figura 2, distribuem-se por três Centros de Produção:

- Cávado-Lima;
- Douro;
- Tejo-Modego.

A elaboração da dissertação de mestrado decorreu em contexto empresarial na EDP Produção, especificamente no Centro de Produção Cávado-Lima com sede em Caniçada.

O Centro de Produção Cávado-Lima promove e assegura a operacionalidade de 17 centrais, 13 barragens e 32 grupos geradores o que totaliza uma potência instalada de cerca 1325 MW. Todas as centrais, de todos os Centros de Produção são operadas à distância pelo Centro de telecomando das Centrais Hidroeléctricas situado em Bagaúste, Régua.

Salienta-se também que neste momento decorrem obras de reforço de potência do Centro de Produção Cávado-Lima com a construção de duas novas centrais hidroeléctricas, Venda Nova III e Salamonde II.

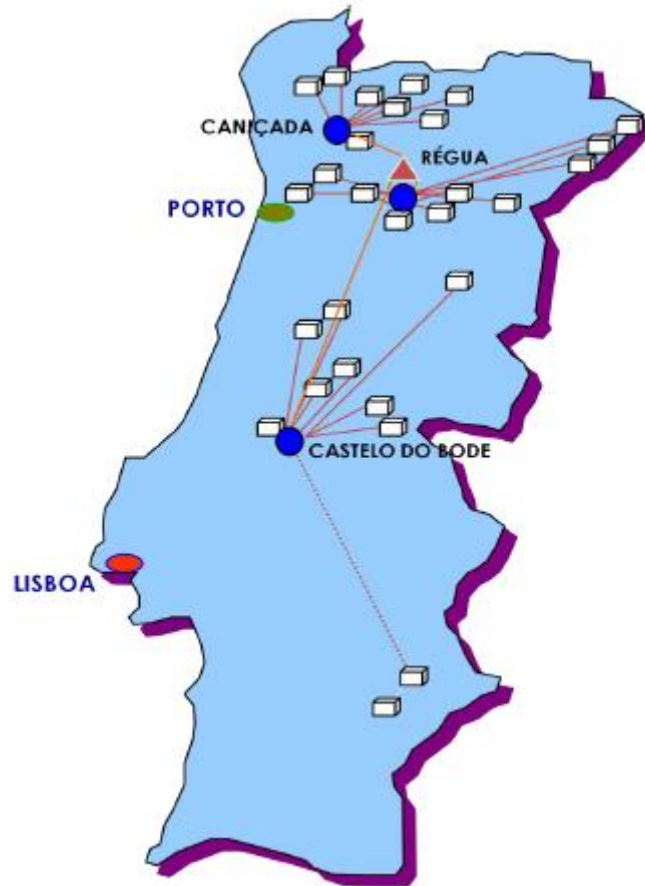


Figura 2 – Centros Produtores (reproduzido de Manual da Organização, 2008) (Direcção da EDP  
 Produção – ● ; Direcção da Produção Hídrica – ● ; Centros de Produção - ● ; Centro Telecomando  
 - ▲

### 3. MOTIVAÇÃO

Um dos problemas existentes num grupo gerador é a vibração a que está sujeito pelo efeito da rotação de grandes massas (turbina, veio e rotor) o que implica equipar o grupo com um sistema de controlo de vibrações. Os grupos geradores estão equipados com um sistema de medição e protecção de vibrações que actua caso seja ultrapassado o nível pré-estabelecido de vibração, o que obriga a uma paragem de emergência. Esta forma de controlo não responde às exigências actuais de funcionalidade e representam custos de operação elevados. Em vários casos não se recolhe a informação funcional histórica para posterior análise porque de facto são sistemas implementados há vários anos, onde estas preocupações ainda não eram necessárias. Com o avanço da tecnologia, facilmente se poderá melhorar o sistema com recolha de histórico para que a qualquer momento possa ser analisada a

evolução do comportamento dinâmico existente permitindo intervir no tempo adequado via implementação da metodologia de manutenção preditiva.

A manutenção de um grupo gerador de uma central hidroelétrica necessita sempre de uma programação detalhada, quer em tempo quer na intervenção técnica, pois a indisponibilidade de um grupo gerador é sinónimo de aumento de custos e diminuição de capacidade de responder às solicitações do consumo. Assim sendo, a implementação de manutenção preditiva poderia eliminar algumas lacunas que possam acontecer nas manutenções correctivas e preventivas pois o “adivinhar” do futuro funcionamento de uma máquina colocaria os responsáveis de manutenção numa posição economicamente mais sustentável.

#### **4. OBJECTIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Perante este enquadramento, e sendo este trabalho de dissertação processado num ambiente de estágio na EDP Gestão da Produção de Energia, serão descritas as técnicas de manutenção utilizadas na empresa assim como serão abordados os sistemas de monitorização e protecção de vibrações instalados. Será também referenciado o caminho proposto para a implementação de manutenção preditiva dedicada aos grupos geradores baseado na pesquisa bibliográfica. É objectivo também da dissertação proceder a ensaios de vibração por forma a verificar a veracidade da dissertação.

A presente dissertação está dividida em 5 partes distintas.

A Parte I apenas refere a introdução ao tema, a motivação do trabalho e uma breve apresentação da exploração dos recursos hídricos pelo Grupo EDP, contextualizando espacialmente o estágio onde decorreu o trabalho da dissertação.

A Parte II é dedicada ao estado da arte. Nesta parte da dissertação é feito um apanhado do assunto manutenção preditiva e a sua aplicabilidade nas centrais hídricas fazendo referência a estudos feitos acerca deste tema. É, também, nesta parte da dissertação feita uma apresentação geral do sistema de manutenção do Centro de Produção Cávado-Lima.

A Parte III é dedicada aos fundamentos teóricos. É objecto de descrição a análise de vibrações direccionada aos grupos geradores hídricos, as normas associadas e apresentadas, caracterizadas e diagnosticadas as falhas comuns dos grupos geradores hídricos.

A Parte IV aborda a aplicação prática. Vários assuntos (interligados e independentes ao mesmo tempo) são apresentados nesta parte. Primeiramente é feita uma caracterização do grupo gerador da

central de Caniçada com ênfase aos seus acoplamentos principais. De seguida é feito o estudo para implementação de manutenção preditiva nessa mesma central. É feito também o levantamento de estado de funcionamento de todos os sistemas de monitorização de vibrações das centrais do Centro de Produção Cávado-Lima e propostas melhorias a implementar. Ainda nesta parte da dissertação, são apresentados e discutidos os resultados, com base nos fundamentos, dos ensaios de vibração realizados na central do Alto Rabagão. Por último, é apresentada a iniciativa optimização da operacionalidade dos sistemas de monitorização de vibrações que surgiu no decorrer do estágio.

A Parte V, e última, apresenta as conclusões da dissertação e trabalhos futuros sugeridos.

## PARTE II – ESTADO DA ARTE



## 1. INTRODUÇÃO

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

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

## 2. MANUTENÇÃO PREDITIVA

O caminho natural da evolução das técnicas de gestão da manutenção é cada vez melhor conseguir corrigir o problema na raiz e no momento mais indicado, técnica e economicamente.

A manutenção preditiva (PDM) compara parâmetros físicos medidos com os limites conhecidos de engenharia com o propósito de detectar, analisar e corrigir problemas antes de uma falha funcional ocorrer. Esta filosofia de manutenção pode ser aplicada a qualquer equipamento desde que parâmetros físicos como vibração, temperatura, pressão, voltagem, corrente, ou resistência possam ser medidos. Os limites destes parâmetros devem ser impostos em conformidade para que os problemas possam ser detectados durante uma monitorização de rotina antes que uma excessiva danificação ocorra (Brown, 2003).

A manutenção preditiva é a manutenção baseada na condição, do órgão ou equipamento. Nesta filosofia de trabalho não existe o agendamento de operações de manutenção mas sim a monitorização da condição mecânica e da eficiência dos equipamentos de modo a indicar a vida útil expectável do órgão/equipamento em condições funcionais e perante os parâmetros de qualidade exigidos. As operações de manutenção são portanto determinadas com o tratamento dos dados adquiridos, pela conjugação de ferramentas de monitorização, das condições de funcionamento dos equipamentos. Com isto evita-se a precoce substituição de vários órgãos inerentes à funcionalidade dos equipamentos (Scheffer *et al*, 2004).

Certos autores elevam a filosofia da manutenção preditiva a uma atitude de melhoria. A máxima optimização, a melhoria produtiva e a qualidade do produto conduzindo a um melhoramento geral da eficiência da fábrica/sistema mecânico. Esta eficiência resulta do estudo organizativo dos dados recolhidos assegurando o máximo intervalo entre reparações minimizando, assim, o número e custo de reparações inesperadas decompondo-as em reparações programadas (Mobley, 2002).

A norma NP EN 13306:2007, responsável pela *Terminologia da manutenção*, define manutenção preditiva como “manutenção condicionada efectuada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos de degradação do equipamento”.

A implementação de manutenção preditiva em determinado equipamento é um processo complexo e que deve obedecer a certas linhas orientadoras para que a eficiência da manutenção seja atingida. Assim, destacam-se as regras gerais à implementação desta filosofia (Telang, 2010):

- Avaliação inicial – Prende-se com a avaliação económica do projecto de implementação. A manutenção preditiva tem custos iniciais bastante avultados pela complexidade e tecnologia dos equipamentos, assim como a formação específica de pessoal para operarem em conformidade, e como tal deve ser feito um estudo económico para avaliar a superioridade dos ganhos proporcionados relativamente ao do investimento;
- Estabelecer os parâmetros de monitorização – Dependendo do equipamento em análise, os parâmetros como vibração, temperatura, pressão, etc. devem ser considerados de forma a garantir que a ocorrência de um desvio ao valor normal é sinalizada antes da ocorrência de falha. O tempo decorrido entre essa ocorrência de desvio (falha potencial – P) e a falha do equipamento (falha funcional – F) deve ser suficiente para que uma operação correctiva seja posta em prática;



- Selecção do parâmetro e do equipamento de medição – A selecção do parâmetro deve depender do tipo de equipamento a monitorizar, dependendo da sua importância para o normal funcionamento, por exemplo, de uma fábrica (equipamento crítico ou não crítico) com base na relação custo-eficiência. Na selecção do equipamento de medição, este deve satisfazer a gama de valores necessários à correcta e total aquisição de valores do parâmetro em causa. Por exemplo, num equipamento de aquisição do parâmetro vibrações a gama de frequência de funcionamento não deve ser descurada;
- Formação de pessoal – A manutenção preditiva, pela sua eficiência, tem uma complexidade de fundamentos inerente e como tal a formação de pessoal deve ser intrínseca à implementação desta tecnologia de manutenção por forma a munir os operadores e responsáveis de manutenção e/ou produção de condição suficiente para interpretar os dados e dotá-los da capacidade de agir activamente sobre os mesmos;
- Processo de aplicação da condição de monitorização – Esta regra refere-se ao estabelecimento das regras a seguir para o bom funcionamento da manutenção preditiva e a sua eficiência prática. O estabelecimento da periodicidade de monitorização, a comparação dos parâmetros com os limites impostos, o estudo exhaustivo do problema específico e a definição da medida correctiva a aplicar;
- Armazenamento de dados – É de extrema importância o armazenamento dos dados obtidos da monitorização de equipamentos, principalmente em equipamentos de vida útil bastante alargada (por exemplo, grupo gerador de uma central hidroelétrica) para comparações e definição de tendências.

A implementação da manutenção preditiva num equipamento deve, portanto, seguir um ciclo do tipo ilustrado na Figura 3.

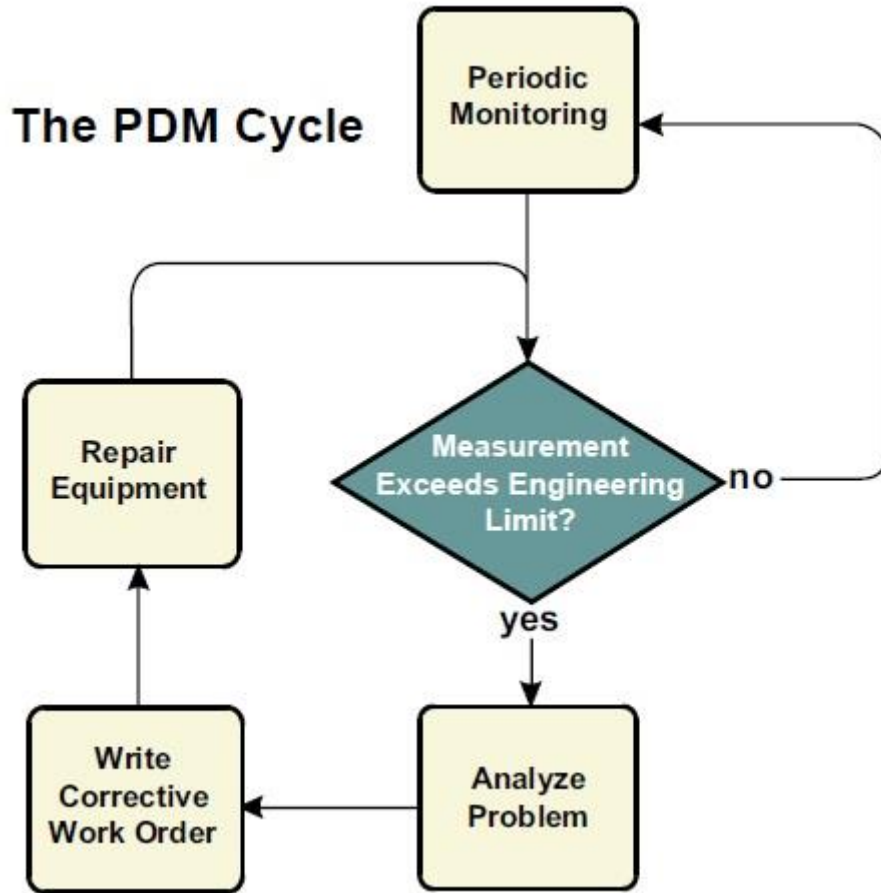


Figura 3 – Ciclo de manutenção preditiva (reproduzido de Brown, 2003)

Tabela 1 – Aplicações/tecnologias para manutenção preditiva (adaptado de NASA, 2008)

Tecnologia	Aplicação				
	Bombas	Motores eléctricos	Geradores a diesel	Transformadores	Permutadores de calor
Monitorização de vibrações	X	X	X		
Tribologia	X	X	X		
Monitorização de performance	X	X	X	X	X
Análise de ruído	X	X	X	X	X
Termografia infravermelha	X	X	X	X	X
Análise por ultra-sons	X				X
Inspecção visual	X	X	X	X	X

Existem uma variedade de tecnologias a suportar os programas de manutenção preditiva. Geralmente a monitorização de vibrações é tida como a chave dos programas de manutenção preditiva, podendo estar conjugada com outras tecnologias e técnicas de aquisição de diferentes parâmetros aplicados como termografia, tribologia, ultra-sons, inspeção visual e outras técnicas de teste não destrutivas. A Tabela 1 demonstra algumas das técnicas utilizadas e as suas aplicações (NASA, 2008).

Os limites dos parâmetros físicos monitorizados são estabelecidos pelos fabricantes, sociedades de profissionais e grupos industriais, normas como por exemplo, ISO 7919-5 que indica os valores limite de vibração do veio de uma turbina hidráulica em operação segura. A periodicidade de medição deve ser ajustada em intervalos de tempo adequados ao estado de vida da máquina e durante a fase inicial da implementação do programa de manutenção preditiva, como por exemplo a curva da banheira, Figura 4. Essa curva indica os períodos críticos de falhas e de funcionamento sem falhas geral de um equipamento. Indica, que no início de vida de uma máquina as falhas são elevadas, diminuindo com a vida da máquina. Na fase final de vida da máquina verifica-se um aumento exponencial de falhas com o avançar do tempo. As medidas correctivas são portanto aplicadas no final de vida do órgão/equipamento.

Segundo a filosofia da manutenção preditiva (PDM), o intervalo de intervenção está entre o final do período de vida útil do equipamento e o início do período de desgaste (Telang, 2010).

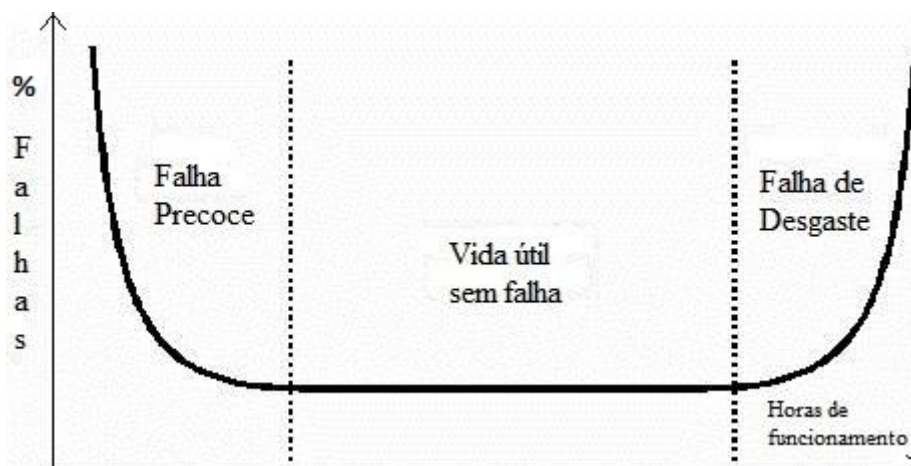


Figura 4 – Curva da banheira (adaptado de Telang, 2010)

Vantagens da implementação de um programa de manutenção preditiva segundo (Scheffer *et al*, 2004):

- Aumento de produção do equipamento;
- Aumento dos intervalos entre manutenções;

- Redução do número de “open, inspect and repair if necessary”;
- Valorização de planeamento do tempo de reparação;
- Aumento de vida útil da máquina;
- Recursos para reparação podem ser planeados antecipadamente;
- Aumento da qualidade de produto;
- Redução de custos de manutenção.

Um programa de manutenção preditiva apresenta também algumas desvantagens, sendo as principais (Mobley, 2002):

- Aumento de custo inicial;
- Exposição do equipamento a possíveis falhas;
- Falhas em novas partes;
- Requer uma maior frequência de acesso ao equipamento.

A implementação de um programa de manutenção preditiva acompanha também a filosofia Total Quality Management que confere às empresas uma maior confiabilidade por parte dos seus clientes. O envolvimento de todas as partes integrantes de uma empresa é inerente à manutenção preditiva cultivando assim uma filosofia de melhoria contínua.

Podemos, portanto, considerar a manutenção preditiva como uma mais-valia para toda e qualquer empresa que prima pelo bom desempenho, eficiência e qualidade. Conjuga-se assim várias ferramentas de engenharia de alto nível. A monitorização de avaliação de condição acompanha os avanços tecnológicos oferecendo a qualidade requerida pelo consumidor final e, por conseguinte, tornando-se altamente competitiva.

### **3. AS CENTRAIS HIDROELÉTRICAS E A MANUTENÇÃO PREDITIVA**

A aplicação de manutenção preditiva nas centrais hidroelétricas não é um assunto novo pelo que durante a pesquisa bibliográfica foram verificados vários estudos e artigos publicados que incidem nessa especificidade.

Existem também vários fornecedores de equipamentos de monitorização de condição que têm sido aplicados a centrais hidroelétricas. Destes, destaca-se Bently Nevada (General Electric), @ptitude Observer (SKF), Vibrometer e Bruel&Kjaer. Estas marcas têm trabalhado no desenvolvimento e

melhoramento dos seus equipamentos muitas vezes em parceria com as universidades, centros de investigação e empresas clientes.

Apesar de se verificar a aplicação de várias técnicas preditivas, desde vibração, termografia, tribologia e até avaliação do torque, a monitorização e protecção de parâmetros nas centrais hídricas está actualmente centrada na análise de vibrações.

Os benefícios da monitorização de condição conduzindo à manutenção preditiva com auxílio da análise de vibrações são inúmeras e no caso específico de aplicação da produção de energia hídrica é sem dúvida um investimento necessário e viável, não só pela importância de funcionalidade dos grupos geradores como também pelo investimento avultado que estes acarretam.

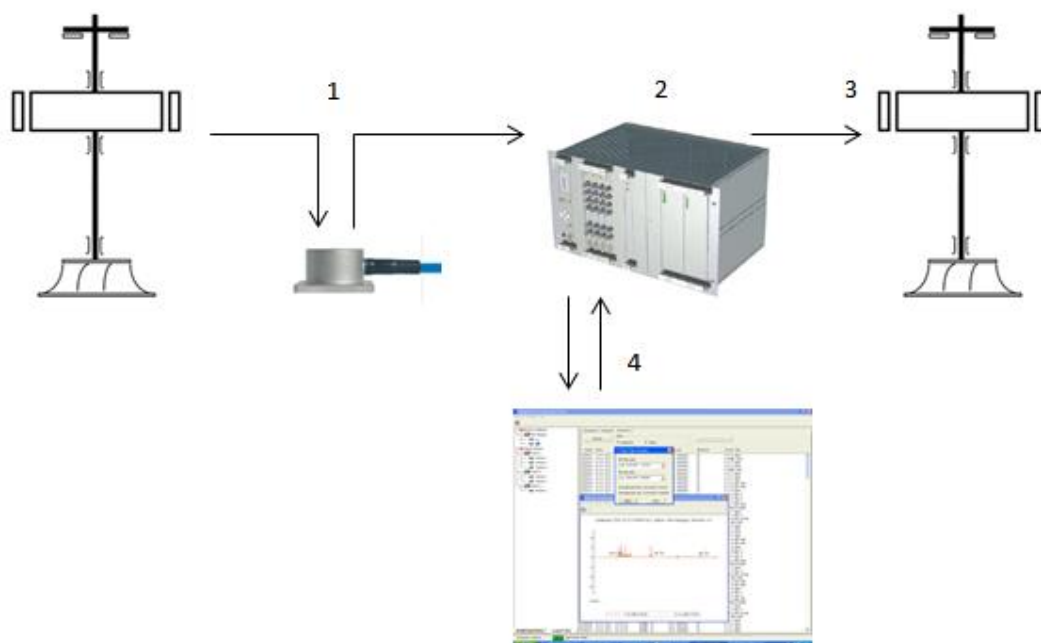


Figura 5 – Esquema de controlo: 1) Aquisição de parâmetros; 2) Processamento de parâmetros; 3) Ordens de funcionamento/paragem; 4) Display, armazenamento e parametrização.

O investimento na monitorização e protecção de vibrações dos grupos geradores hídricos tem um retorno que poderá ser dividido em três pontos (GE, 2011):

- Retorno através da protecção: protecção do grupo gerador de falhas catastróficas e seus custos associados;
- Retorno através da validação mecânica: fornece informações de base da condição dos grupos geradores, pré e pós manutenção, facultando referências para decisões;

- Retorno através de uma gestão preditiva/proactiva: fornece informações permitindo gerir soluções proactivamente e desenvolver regimes de manutenção perante a condição dos equipamentos.

O funcionamento destes sistemas de monitorização e protecção de vibração dos grupos hídricos pode ser representado pelo esquema da Figura 5.

A Figura 6 elucida o esquema apresentado anteriormente.

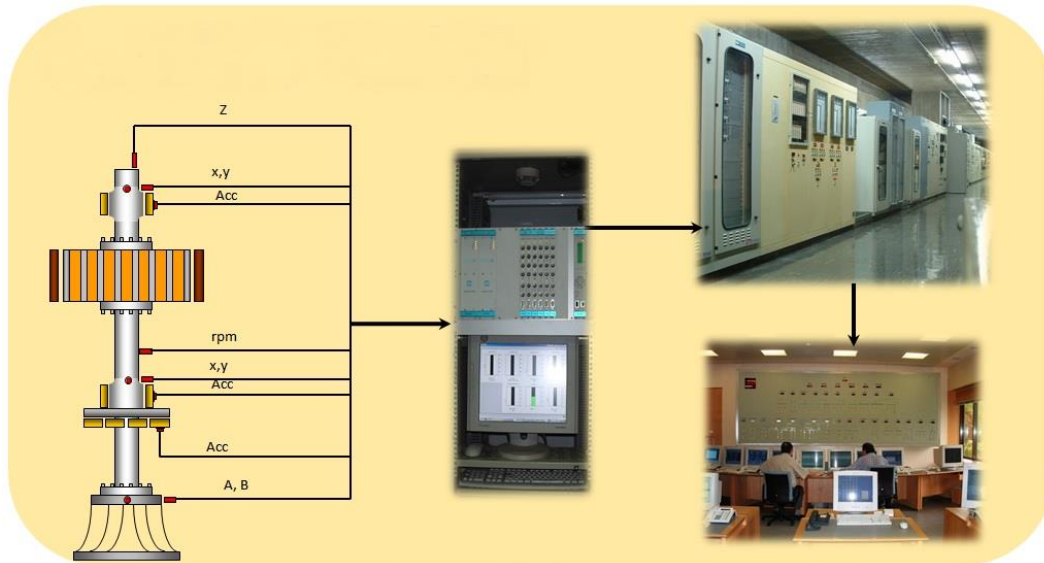


Figura 6 – Controlo do grupo gerador (reproduzido de Peixoto, 2012)

(Tenzin, 2012) apresenta benefícios da monitorização do comportamento dinâmico de um grupo gerador de uma central hídrica através da recolha de dados de vibração do veio e da monitorização do entre-ferro. Com a monitorização destas duas variáveis e conseguinte análise de alinhamento, balanceamento, deslocamentos relativos, forma do rotor, etc. defende a capacidade de estas análises facultarem um diagnóstico antecipado através da alteração do comportamento dinâmico do grupo gerador prevenindo assim acidentes catastróficos e indisponibilidade de longa duração para manutenções.

A análise de vibrações como técnica preditiva em grupos geradores hídricos é comumente utilizada com a avaliação da vibração lateral, isto é, através de deslocamentos relativos do veio e rotor relativamente às suas chumaceiras. No entanto, a avaliação da vibração torsional do veio do grupo gerador pode ser também utilizada como uma técnica para a aplicação de uma filosofia de

manutenção preditiva. (Maynard, 2001) apresenta um estudo denominado aplicação de medição de vibração torsional para monitorização do veio em centrais.

A análise do comportamento dinâmico de um grupo gerador hídrico através da técnica preditiva de análise de vibrações pode ser analisada como função do regime de funcionamento do grupo gerador. (Dunca, 2012) apresenta um estudo em que utilizou a análise de vibrações não como uma técnica preditiva directa para a especulação de possíveis manutenções mas para avaliar a gama de operação do grupo gerador onde refere que deve ser evitada a operação das máquinas avaliadas em carga parcial. Além da análise de vibrações, apoia o seu estudo também numa outra técnica preditiva, a avaliação do ruído.

Outras técnicas preditivas têm sido abordadas. (Ezeasor, 2010) avalia, na sua dissertação de mestrado, quatro técnicas de detecção de cavitação em grupos geradores hídricos. No seu estudo de monitorização de condição relativamente ao fenómeno de cavitação hierarquiza as técnicas vibro-acústica, observação visual, vibração e emissão acústica por ordem de preferência, respectivamente.

(Wiedenbrug, 2013) apresenta um outro artigo em que aplica uma outra técnica. Apresenta a monitorização instantânea do torque como uma técnica preditiva avaliando a voltagem e corrente o que poderá ser alvo de estudo específico a um grupo hídrico, seja no regime de funcionamento como gerador ou bomba.

Os elevados custos de implementação de sistemas de monitorização de vibrações permanentes têm conduzido ao estudo de aplicabilidade destes sistemas. A simulação numérica poderá ser efectivamente uma mais-valia pelo que poderá avaliar a necessidade de equipar determinado grupo gerador com um sistema permanente de monitorização de vibrações para o caso de se verificar grandes oscilações aquando da simulação numérica (Tenzin, 2010). Ainda neste artigo é apresentada a sugestão de implementação de sistemas híbridos de monitorização de vibrações com a utilização de analisadores de vibração portáteis e utilização de transdutores de vibração, módulos de transmissão de vibração e PLC assegurando um custo bastante inferior aos sistemas convencionais de monitorização permanente de grupos geradores hídricos.

#### **4. SISTEMA DE MANUTENÇÃO DO CENTRO DE PRODUÇÃO CÁVADO-LIMA**

A filosofia de manutenção presente no Centro de Produção Cávado-Lima é essencialmente preventiva. No entanto, manutenção correctiva e melhorativa é também uma constante, pela dimensão, complexidade e importância da produção hídrica.

O sistema de manutenção que faz parte do dia-a-dia das centrais hídricas tem sido desenvolvido e melhorado ao longo dos anos, por um lado pelos avanços tecnológicos e por outro pela afirmação da EDP, S.A. como uma empresa de qualidade e altamente competitiva.

A organização e adopção da programação sistemática de conservação e manutenção remontam aos anos 80. Esta organização e programação foram feitas na base do conhecimento técnico, dos técnicos e engenheiros das várias centrais hídricas, e do levantamento do historial dos equipamentos e instruções de manutenção fornecidas pelo fabricante com auxílio aos modelos de determinação de fiabilidade das máquinas. As palavras-chave a considerar durante o levantamento de instruções para a manutenção preventiva (ou sistemática) em equipamentos de uma central hídrica poderão enumerar-se como:

- Fugas (óleo, água, ar, etc.);
- Níveis (óleo, água, etc.);
- Medições (temperatura, caudal, pressão, etc.);
- Apertos;
- Limpeza;
- Ruídos;
- Substituição (filtros, óleo, etc.);
- Análise de óleos;
- Funcionamento;
- Controlo (desgaste, horas de funcionamento, etc.);
- Lubrificação;
- Purgas;
- Pintura;
- Corrosão;
- Cavitação;
- Fissuras;
- Verificação visual.

As mais antigas centrais hídricas do país já se encontram em funcionamento há cerca de um século pelo que muitas delas já não tinham um histórico de manutenção ou instruções de manutenção do fornecedor do equipamento. Nestes casos, o *know-how* dos colaboradores foi essencial na programação sistemática de conservação e manutenção.



Numa primeira fase de implementação de manutenção preventiva, nos anos 80, todo o processo era manual com preenchimento de listas de ordens de manutenção segundo a designação do equipamento e a periodicidade da mesma. Todos os equipamentos estão devidamente identificados e organizados segundo uma norma interna da empresa que “define a codificação a utilizar para equipamentos e elementos de obra do parque da Produção Hidráulica” (Norma 16).

As designações das periodicidades (através de letras) dos pacotes de (listas) de tarefas existentes nos Planos de Manutenção de Sistemática Preventiva das centrais do Centro de Produção Cávado-Lima são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Periodicidades de manutenção

Designação	Periodicidade
A	Semanal
B	Quinzenal
C	Mensal
W	Bimestral
D	Trimestral
E	Semestral

Designação	Periodicidade
F	Anual
G	Bienal
H	Quadrienal
I	Octoenal
J	Bioctoenal

Esta base de periodicidades são fruto do conhecimento adquirido ao longo dos anos de experiência e alteradas sempre que pertinente. Estas periodicidades estão relacionadas com a afectação das manutenções ao funcionamento do grupo gerador. Periodicidades do tipo H, I e J requerem indisponibilidade do grupo gerador.

Inicialmente, a indisponibilidade dos grupos geradores tinha uma programação anual onde todo o grupo era verificado. Porém, houve a necessidade de alterar esta periodicidade pela especificidade que o mercado tem vindo impor e como tal a manutenção foi obrigada a uma adaptabilidade tecnológica. Verificou-se, portanto, um aumento progressivo da programação sistemática no que confere ao intervalo de tempo entre as manutenções que obrigam à indisponibilidade dos grupos geradores.

Actualmente, a programação sistemática de indisponibilidade dos grupos geradores está parametrizada para acontecer de 4 em 4 anos (esta periodicidade verifica-se, essencialmente, pelo máximo intervalo aceitável sem necessidade de beneficiação da roda da turbina). Porém, existem órgãos afectos ao normal funcionamento do grupo gerador que não atingem um tão alargado tempo de

funcionamento sem sofrer intervenções de manutenção. Para esses órgãos específicos são criadas listas de manutenção baseadas em horas de funcionamento que criam indisponibilidade do grupo gerador mas não tão alargada como a da programação sistemática.

A necessidade de adaptabilidade da manutenção contribui para a implementação de novas técnicas de avaliação ao estado dos equipamentos. Por se tratar de máquinas críticas surgiu também a necessidade de protecção dos grupos geradores tendo sido entretanto instalados sistemas de monitorização e protecção de vibrações. Com estes sistemas, é possível retirar alguns dados elucidativos do avançar da degradação do equipamento.

A manutenção correctiva é aplicada sempre que necessário, especialmente quando a deficiência está afectada ao normal funcionamento do grupo gerador e colocando em perigo a condição de funcionamento de outros órgãos.

A programação sistemática de conservação e manutenção foi informatizada com o avançar da tecnologia informática estando actualmente inserida em sistema SAP (sistema de gestão empresarial).

#### **4.1. Manutenção preditiva no Centro de Produção Cávado-Lima**

O Centro de Produção Cávado-Lima, por volta do ano 2000, passou a integrar no seu sistema de manutenção um projecto de implementação de manutenção preditiva.

A manutenção preditiva implementada estava direccionada aos “equipamentos auxiliares” dos grupos geradores contemplando, sobretudo, bombas e motores. Desde bombas de injeção, esgoto, drenagem e regulação todas eram sujeitas a um *tour* de aquisição de dados de vibração. Para isso, foram colocadas em cada equipamento, sujeito à medição, duas pastilhas de aço inox desfasadas a 90° para que as medições efectuadas pelos técnicos sejam feitas no mesmo local específico do equipamento entre as várias *tour* de medições. As medições eram feitas por técnicos da empresa com um equipamento de medição de vibrações portátil.

Os dados recolhidos eram, posteriormente, tratados pelos técnicos. Os técnicos que procediam a este trabalho receberam formação específica na área de manutenção preditiva com ênfase à análise de vibrações.

Porém, este projecto de implementação de manutenção preditiva foi mais tarde abandonado com a conclusão que não era viável. Os resultados de primeira instância não induziam em alterações significativas do comportamento dos equipamentos que eram sujeitos às medições e o facto de, nas

centrais hídricas, haver redundância deste tipo de equipamentos contribuiu para a não justificação de continuação do projecto de implementação de manutenção preditiva.

O projecto durou cerca de dois anos.



## PARTE III – FUNDAMENTOS TEÓRICOS



## 1. INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda conceitos teóricos intrínsecos à manutenção preditiva, com base na técnica de análise de vibrações.

Numa primeira fase são expostos alguns conceitos teóricos de análise de vibrações e a sua ligação à prática da manutenção preditiva.

As normas ISO 7919-5 e ISO 10816-5 serão também explanadas neste capítulo por se considerar bastante útil para o entendimento do próximo capítulo, especialmente no que diz respeito à interpretação de resultados.

A manutenção preditiva com base na análise de vibrações é uma matéria com alguma fundamentação em estudo que foram e têm vindo sendo feitos relativamente às máquinas rotativas pelo que existem estudos que apresentam as falhas comuns em grupos geradores e como essas falhas podem ser diagnosticadas. Essas falhas são, essencialmente, identificadas com alterações nos espectros de frequência e nessa base serão apresentadas as características de diagnóstico para serem utilizadas como fundamento no capítulo seguinte.

## 2. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

A análise de vibração é uma técnica de detecção de desalinhamentos e balanceamentos inadequados antes dessas condições tornarem-se em esforços nefastos ou deterioração do veio e outros componentes o que se aplica integralmente ao tema em estudo (grupo gerador de uma central hídrica).

Um sistema de análise de vibrações pode ser dividido em 4 partes:

- Aquisição de sinais, sensores;
- Analisador de sinais;
- Software de análise;
- Computador para análise e armazenamento de dados.

Este tipo de sistemas é adequado para sistemas mecânicos críticos, que é exemplo os grupos geradores das centrais hídricas, sendo uma ferramenta importante para a redução e eliminação de problemas recorrentes das máquinas rotativas (80% dos problemas de máquinas rotativas estão relacionados com desalinhamento e balanceamento inadequados) (Scheffer *et al*, 2004).

O conceito vibração está definido pela norma ISO 2041:1990. “*Vibration: The variation with time of the magnitude of a quantity which is descriptive of the motion or position of a mechanical system , when the magnitude is alternately greater and smaller than some average value or reference*”.

Os sistemas mecânicos podem ser analisados como sistemas vibratórios, estudando assim as forças dinâmicas actuantes e os movimentos oscilatórios do sistema.

O sistema mecânico, ou sistema vibratório com um grau de liberdade (Figura 7), é composto por 3 elementos fundamentais:

- Massa;
- Mola;
- Amortecedor.

Cada componente tem a sua função específica. Respectivamente: armazenar energia cinética (massa ou inércia), armazenar energia potencial (elemento elástico ou mola) e dissipar energia (amortecedor).

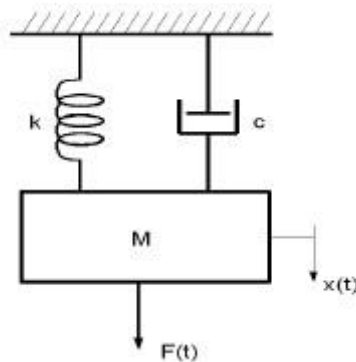


Figura 7 – Sistema vibratório (reproduzido de Rodrigues, 2012)

Para ocorrer o fenómeno dinâmico de vibração forçada, terá de existir uma força excitadora externa,  $F(t)$ . Essa excitação pode ser de caracterizada da seguinte forma, Figura 8:

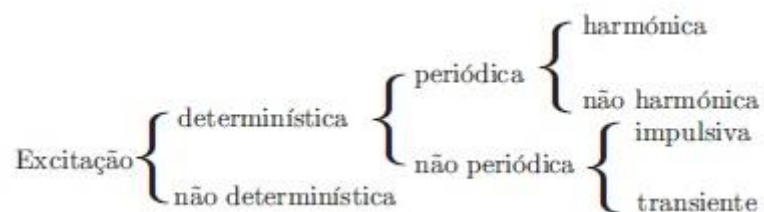


Figura 8 – Caracterização da excitação (reproduzido de Rodrigues, 2012)



Na análise de vibrações existem algumas etapas a serem consideradas. A criação de um modelo matemático adequado ao sistema real que se pretende analisar deve seguir alguns passos e simplificações. Assim, enumera-se (Rodrigues, 2012):

1. Modelo físico
  - a. Identificação dos componentes do sistema;
  - b. Propriedades mecânicas;
  - c. Condições de fronteira;
  - d. Número de graus de liberdade
  
2. Modelo matemático
  - a. Teoremas vectoriais da dinâmica
    - i. 2ª lei de Newton;
    - ii. Princípio d'Alembert.
  - b. Métodos energéticos
    - i. Princípio dos deslocamentos virtuais;
    - ii. Princípio de Hamilton;
    - iii. Equações de Lagrange.
  
3. Resolução das equações diferenciais de movimento
  - a. Métodos analíticos;
  - b. Métodos numéricos;
  - c. Formalismo matricial.
  
4. Interpretação dos resultados

Recorrendo às Transformadas de Fourier, um problema de vibrações pode ser convertido de uma análise temporal para uma em frequência, ajudando à interpretação de resultados.

Qualquer fenómeno vibratório pode ser expresso pela seguinte equação de movimento:

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = F(t)$$

Em que:

$m$  – massa;

$c$  – constante de amortecimento;

$k$  – constante de mola;

$t$  – tempo;

$F$  -força excitadora;

$x$  – deslocamento;

$\dot{x}$  - velocidade;

$\ddot{x}$  - aceleração.

Admitindo que o fenómeno vibratório é harmónico, a avaliação da vibração pode ser feita determinando um dos seguintes parâmetros:

$$x(t) = X_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

$$\dot{x}(t) = X_0 \cdot \omega \cdot \text{cos}(\omega \cdot t)$$

$$\ddot{x}(t) = -X_0 \cdot \omega^2 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)$$

Em que:

$X_0$  – posição máxima do corpo;

$\omega$  – velocidade angular.

Outra forma de quantificar a vibração pode ser em torno do valor eficaz, RMS (Root Mean Square) que é utilizada para expressar a grandeza referida, deslocamento, velocidade e aceleração. O valor RMS tende a prover a energia contida no sinal de vibração tendo sido portanto escolhida pela ISO para estabelecer os limites de vibração.

A vibração é assim um fenómeno dinâmico dos equipamentos que pode ser representada em termos de deslocamento, velocidade e aceleração tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. A leitura de vibração é sempre feita no domínio do tempo sendo depois processada num analisador e transformada pelo cálculo de FFT (Fast Fourier Transform) para o domínio de frequência obtendo-se assim o espectro de frequências de vibração, como ilustra a Figura 9.

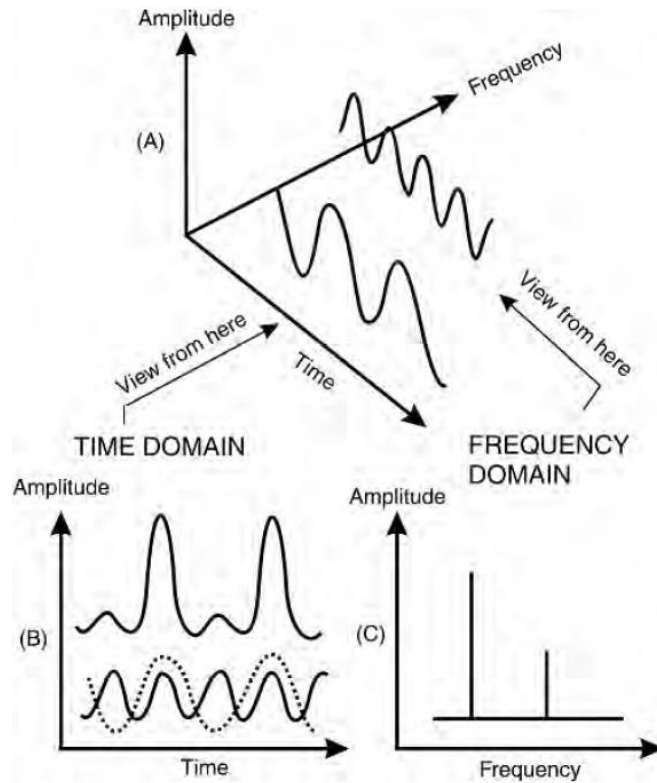


Figura 9 – Transformada de Fourier em ilustração (reproduzido de Scheffer *et al*, 2004)

### 2.1. Vibração lateral (LRV)

A vibração lateral do rotor, também chamada de vibração transversa do rotor, está relacionada com o movimento orbital no plano radial.

Este tipo de vibração é comumente referido a veios rígidos que vibram em chumaceiras flexíveis, funcionando estes suportes como amortecedores de vibração. No entanto, a Figura 10 apresenta uma ilustração exagerada de vibração lateral de um veio flexível em chumaceiras rígidas.



Figura 10 – Ilustração de órbita em LRV (reproduzido de Adams, 2010)

O modelo mecânico simples de demonstrar a vibração lateral do rotor tem dois graus de liberdade e expressa-se pelas seguintes equações do movimento:

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c_x \cdot \dot{x}(t) + k_x \cdot x(t) = F_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$m \cdot \ddot{y}(t) + c_y \cdot \dot{y}(t) + k_y y(t) = F_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

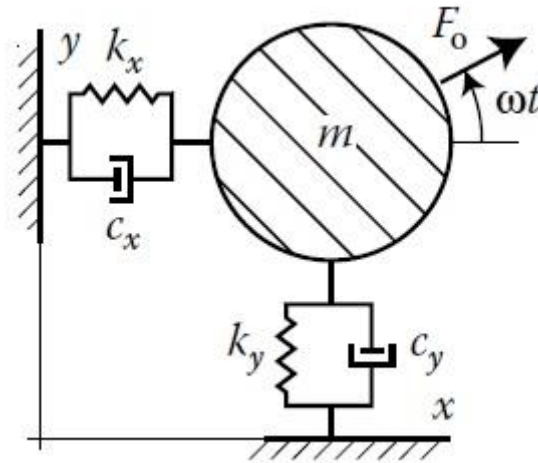


Figura 11 – Modelo mecânico LVR com 2 graus de liberdade (reproduzido de Adams, 2010)

Este modelo e respectivas equações são as formulações fundamentais para um problema de LRV para análise. Os modelos mecânicos para análise de vibrações poderão ser bastante complexos pelo que é prática usual fazer uso da tecnologia computacional e sobretudo de aquisição de dados, neste caso de vibração, para a análise dos modelos ao invés de formulações analíticas (Adams, 2010).

## 2.2. Vibração torsional (TRV)

A vibração torsional é a vibração rotacional de distorção angular em relação ao seu eixo de referência imposta pela velocidade angular.

Esquemáticamente, para um sistema de um grau de liberdade tem-se, Figura 12:

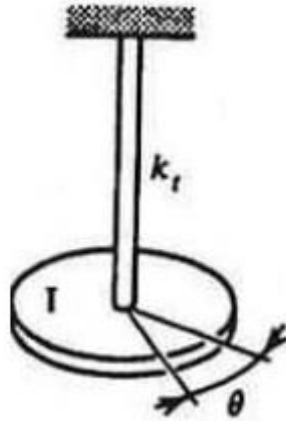


Figura 12 – Modelo mecânico de análise de torção de um sistema com 1 grau de liberdade  
(reproduzido de Meireles, 2012)

A equação do movimento destes sistemas é dado por:

$$I \cdot \ddot{\theta} + k_t \cdot \theta = 0$$

Em que:

$$I = m \cdot \frac{D^2}{8}$$

$$\theta = \frac{T \cdot L}{G \cdot I}$$

$$k_t = \frac{T}{\theta} = \frac{G \cdot I}{L} = \frac{G \cdot \pi \cdot d^4}{32 \cdot L}$$

Em que:

$\theta$  – Ângulo de torção;

$k_t$  – Constante de torção;

$I$  – Inércia polar;

$m$  – Massa do disco;

$D$  – Diâmetro do disco;

$T$  – Momento de torção;

$L$  – Comprimento;

$G$  – Módulo de elasticidade transversal do material da mola (haste de torção).

A análise TRV é, muitas vezes, desprezável pelo simples facto das máquinas estarem equipadas com veios suficientemente rígidos à torção. Com isto, verifica-se que as frequências naturais de torção são elevadas evitando assim atingir o patamar de ressonância.

Porém, os grupos geradores térmicos em que as velocidades de rotação são elevadíssimas e com vários rotores ao longo da linha de veios são alvo desta análise.

No entanto, este tipo de vibração poderá tornar-se catastrófico rapidamente. Sem sintomas óbvios poderá ser verificado o colapso de um veio devido a fenómenos de fadiga do material o que é altamente prejudicial e perigoso em máquinas críticas. Por outro lado, a análise TRV tem uma capacidade de modelação de análise preditiva bastante mais apurada que a LRV precisamente por não depender das chumaceiras e outros órgão que interagem com o veio (Adams, 2010).

Na tabela seguinte, Tabela 3, mostram-se alguns contrastes entre LRV e TRV.

Tabela 3 – Comparação entre LRV e TRV (adaptado de Adams, 2010)

LRV	TRV
Sempre uma consideração importante	Muitas vezes é desprezável
Os modos de ressonância são, por norma, suficientemente amortecidos pelas chumaceiras	Os modos de vibração são levemente amortecidos sendo portanto, a ressonância um fenómeno a contemplar no projecto
Muito difícil de modelar e simular computacionalmente de modo preciso devido às imprecisas características dinâmicas das chumaceiras	Relativamente fácil de modelar e simular de modo preciso pela dissociação dos modos LVR
Facilidade de monitorizar. Não apresenta perigo excessivo sem sintomas sendo a monitorização LRV actualmente uma aplicação comum.	Poderá apresentar valores excessivos sem sintomas óbvios mesmo através da monitorização. O primeiro sinal de falha pode ser visto apenas quando é verificada uma falha de fadiga no veio.

### 3. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM GRUPOS GERADORES HÍDRICOS

A manutenção preditiva tem ganho destaque no mundo da manutenção, sobretudo quando se fala em manutenção de equipamentos de investimentos avultados, como é o caso dos grupos geradores das centrais hídricas.

A manutenção preditiva nos grupos geradores hídricos assenta na monitorização de vibrações utilizando técnicas de medição de vibração, fundamentalmente lateral. A utilização desta técnica é conseguida através da monitorização de vibrações com a instalação de equipamentos de monitorização no grupo gerador, como se verá no próximo capítulo.

Com a análise de vibrações destes grupos geradores torna-se possível um mais exaustivo conhecimento da máquina. Todas as máquinas têm modos de vibração característicos e tal é alterando quando algo interfere, nomeadamente anomalias de funcionamento. Estas características estão assentes nas frequências de funcionamento e frequências naturais que caracterizam os modos de vibração e esta informação de frequência tem a capacidade de diferenciar um bom funcionamento do grupo gerador de um mau funcionamento ou funcionamento com anomalias.

A monitorização para análise de vibrações utiliza acelerómetros para a medição de aceleração absoluta, em componentes fixos do grupo gerador, e sensores de deslocamento para medir o deslocamento relativo radial (chumaceira-veio).

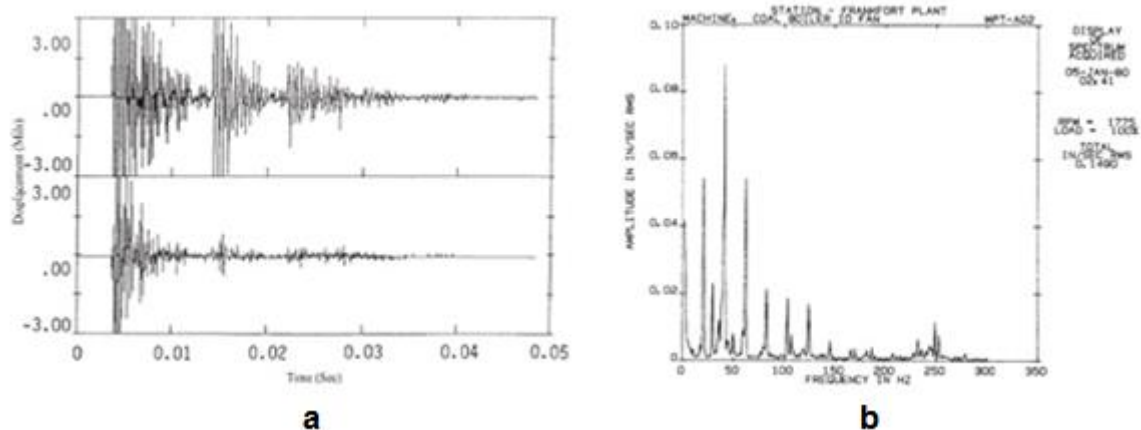


Figura 13 – Espectros: a) Espectro no domínio do tempo; b) Espectro no domínio da frequência (reproduzido de Almeida, 2008)

A análise no domínio do tempo, através da avaliação de severidade de vibração, confere dos grupos geradores a informação necessária para a parametrização dos alarmes e o enquadramento nos patamares de qualidade de funcionamento baseada nas normas associadas a estes equipamentos. Isto é, foram criadas as normas ISO que estabelecem valores indicadores como velocidade RMS, amplitude pico a pico e deslocamento máximo para caracterizar o funcionamento do grupo gerador. A análise no domínio do tempo torna-se portanto bastante útil na protecção de vibrações dos grupos geradores.

A análise no domínio frequência assenta na análise espectral através do uso do algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) obtendo-se assim o espectro de frequências do sinal. Esse espectro de

frequências indicará anomalias, desvios de funcionamento normal e tendências de vibração (Mobley, 2002; Almeida, 2008).

#### 4. NORMAS

Os grupos geradores hídricos têm duas normas associadas para avaliar a severidade de vibração dos equipamentos e enquadrá-los num bom ou mau funcionamento a longo prazo. Uma relativamente a partes estacionária e outra a partes rotativas.

As partes rotativas, nomeadamente o veio do grupo gerador, utiliza a medida de deslocamento do eixo como critério de avaliação da condição de vibração. A norma ISO 7919-5 informa e orienta relativamente às medições de vibração no veio rotativo do grupo gerador. Esta norma esclarece acerca de posicionamento de sensores, classifica o funcionamento do grupo gerador perante a amplitude de vibração e caracteriza a parametrização dos alarmes e disparos.

As partes estacionárias dos grupos geradores estão, também estas, instrumentadas. Acelerómetros instalados nas zonas críticas fornecem a informação de vibração absoluta do equipamento. A norma ISO 10816-5 é a responsável pela orientação normativa dos limites de vibração medidos em partes estacionárias do grupo gerador. A norma informa acerca da localização de medição, classificação da vibração, unidade adequada de leitura perante a velocidade de rotação do grupo gerador e parametrização dos alarmes e disparos.

Ambas as normas serão apresentadas em mais detalhe pois considera-se que dispõem de informação para fundamentar capítulos seguintes.

##### 4.1. ISO 7919-5

A norma ISO 7919 trata da vibração mecânica – avaliação da vibração da máquina com medições em veios rotativos sendo que a parte 5 aborda os grupos bomba e/ou geradores hídricos.

Esta norma apresenta as linhas orientadoras para aplicar medições de vibração nos veios dos grupos hídricos. Da apreciação da norma, sobressai a referência relativamente à localização dos sensores, que deverá ser em todas as chumaceiras principais com os sensores localizados em dois planos, x e y (ou seja, um desfasamento de 90° entre cada sensor). A norma estabelece (Figura 14) os limites de vibração em deslocamento máximo ( $S_{m\acute{a}x}$ ) e deslocamento pico a pico ( $S_{pk-pk}$ ) classificando a vibração em duas gamas de funcionamento:



- **A-B:** Máquinas com amplitudes de vibração nesta gama são consideradas aceites para operação a longo termo sem restrições;
- **C-D:** Máquinas nesta gama apresentam amplitudes de vibração muito elevadas. É necessário verificar cada caso para avaliar a continuidade de operação a longo termo considerando as características da máquina e as suas condições de funcionamento.

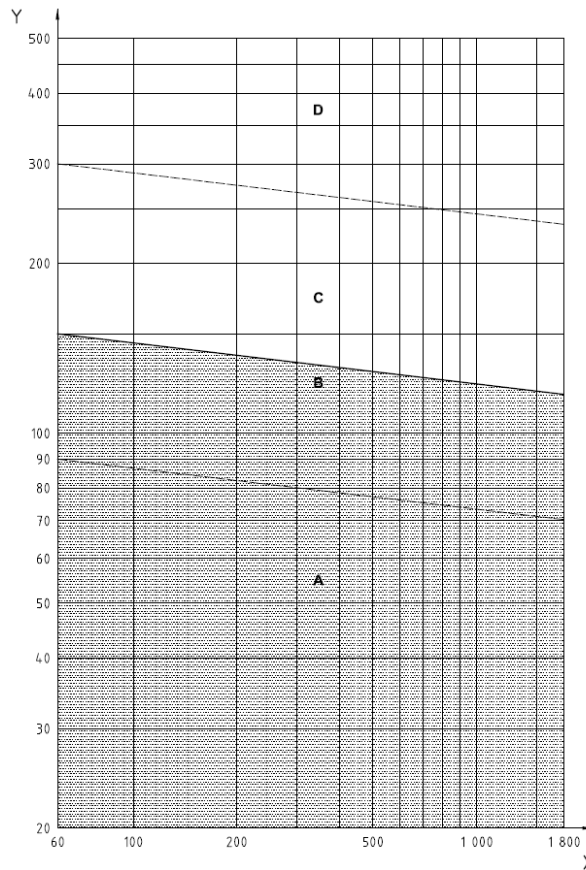


Figura 14 – Avaliação de vibração recomendada para deslocamento máximo ( $S_{máx}$ ). Y: deslocamento relativo máximo ( $\mu m$ ); X: velocidade de rotação (rpm). (reproduzido de ISO 7919-5)

A parametrização de alarmes e disparos é também referida na norma. Os alarmes variam de máquina para máquina pelo que antes de se estabelecer limites de alarme deve ser conhecido o comportamento dinâmico da máquina para criar uma linha de base. Os disparos devem especificar valores em que a operação da máquina poderá causar graves danos nos equipamentos obrigando assim a uma paragem de emergência. Os valores de alarme devem ser acima da linha de base determinada para determinada máquina com 25% acima da gama **A-B**. No entanto, se a linha de base for baixa, o valor de alarme deve ser abaixo de **C-D**. A parametrização de disparos não deve ultrapassar duas vezes o valor máximo da gama **A-B** para determinada rotação.

A norma ISO 7919-5 refere ainda que falhas mecânicas como desalinhamento, massas desequilibradas, problemas de chumaceiras, instabilidade do filme de óleo, etc. são caracterizadas por alterações da amplitude da frequência de rotação e suas harmónicas.

Outras informações podem ser verificadas consultando a norma.

#### 4.2. ISO 10816-5

A norma ISO 7919 trata da vibração mecânica – avaliação da vibração da máquina com medições em peças não rotativas sendo que a parte 5 aborda os grupos bomba e/ou geradores hídricos.

Esta norma é mais específica do que a referida anteriormente pelo que divide em 4 tipos de máquinas segundo a velocidade de rotação e disposição dos grupos geradores (vertical e horizontal). A maioria dos grupos geradores do Centro de Produção Cávado-Lima assenta no grupo 3 da norma – máquinas verticais com chumaceiras apoiadas nas fundações e com velocidades de rotação entre 60 e 1800 rpm.

A localização dos sensores (acelerómetros) é também apresentada na norma ISO 10816-5 que refere as principais chumaceiras como locais a instalar os sensores, como se ilustra na Figura 15.

Esta norma não apresenta valores de referência em forma de gráfico como a norma ISO 7919-5. Neste caso, os valores são apresentados em tabela para determinada gama de velocidade de rotação e determinado tipo de máquina. Para a maioria do tipo de máquinas hídricas instaladas no Centro de Produção Cávado-Lima, a Tabela 4 estabelece os valores referência.

Em que:

- **A** – Amplitude de vibração características de máquinas novas;
- **B** – Máquinas com amplitude de vibração aceitável para operação a longo termo sem restrições;
- **C** – Máquinas com amplitude de vibração considerada insatisfatória para operação continua a longo termo. Geralmente, máquinas nesta zona de vibração devem operar por períodos de tempo limitados até intervenção de manutenção da máquina;
- **D** – Amplitudes desta dimensão são consideradas perigosas para operação da máquina podendo causar danos.

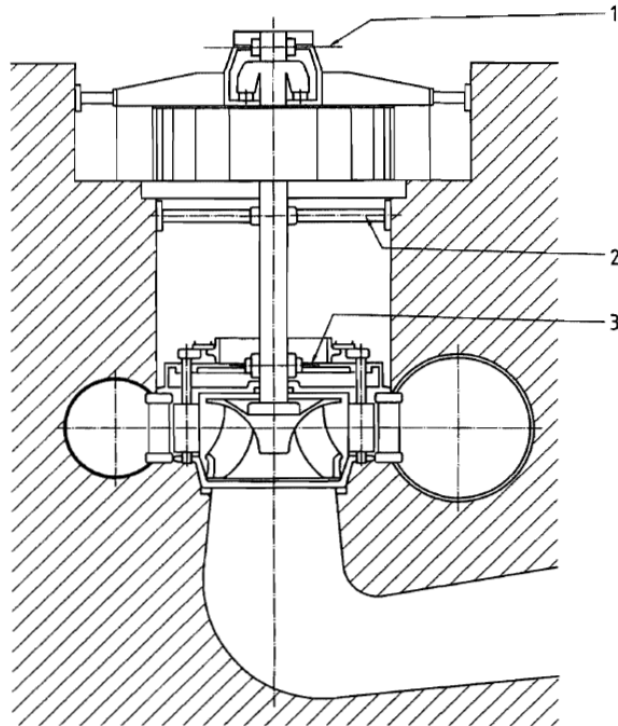


Figura 15 – Localização dos sensores para máquinas do grupo 3. 1) chumaceira superior do alternador; 2) chumaceira inferior do alternado; 3) chumaceira superior da turbina (reproduzido de ISO 10816-5)

Tabela 4 – Valores de vibração absoluta recomendados para máquinas verticais em operação entre 60 e 1800 rpm (reproduzido de ISO 10816-5)

Zone boundary	At all main bearings	
	Peak-to-peak displacement μm	R.m.s. velocity mm/s
A/B	30	1,6
B/C	50	2,5
C/D	80	4,0

Na parametrização de alarmes de vibração absoluta, o valor limite deve ser acima da linha de base determinada para determinada máquina e 25% acima do limite superior da zona **B**. No entanto, se a linha de base for baixa, o alarme deverá ser abaixo da zona **C**. É referido também nesta norma que é aconselhável o valor limite de alarme não ultrapassar 1,25 vezes o limite superior da zona **B** (por exemplo, na Tabela 4, é 2,5 mm/s). Relativamente à parametrização de disparos, a norma aconselha a não ultrapassar 1,25 vezes o limite superior da zona **C**.

Relativamente a falhas comuns em grupos geradores hídricos, a norma ISO 10816-5 é similar à norma ISO 7919-5.

Outras informações podem ser verificadas consultando a norma.

## **5. FALHAS COMUNS EM GRUPOS GERADORES HÍDRICOS. DESCRIÇÃO E DIAGNÓSTICO.**

Neste ponto serão abordadas as principais falhas verificadas em grupos geradores hídricos bem como o diagnóstico dessas falhas através da análise de vibrações.

Com o progresso tecnológico as máquinas rotativas foram sofrendo alterações consideráveis quanto às suas características físicas e mecânicas. As massas têm sido reduzidas ao contrário das velocidades de rotação que têm sido aumentadas para alcançar novos patamares de eficiência. O mesmo acontece com os grupos geradores hídricos, que em tempos caracterizavam-se pela sua enorme envergadura e que nos tempos actuais têm sido reduzidos tanto em peso como em tamanho. Este progresso reflecte-se em efeitos dinâmicos nefastos. O abaixamento da massa de um grupo traduz-se numa diminuição da sua rigidez que por conseguinte diminui as frequências naturais do equipamento tornando-se mais susceptível a problemas de ressonância.

As falhas mais comuns verificadas em grupos geradores hídricos podem ter origens diferentes. Estas podem ser de origem mecânica, hidráulica e eléctrica.

Neste caso específico serão abordadas as principais falhas de origem mecânica. Assim, as falhas mais comuns encontradas em grupos geradores hídricos são:

- Desequilíbrio de massas rotativas;
- Desalinhamento;
- Defeitos nas chumaceiras.

Será também abordada uma outra falha bastante comum em grupos geradores hídricos. Neste caso de origem hidráulica: cavitação.

### 5.1. Desequilíbrio de massas rotativas

A vibração devido a um desbalanceamento de massas é, provavelmente, a falha mais comum em máquinas rotativas. O desequilíbrio (unbalance) está definido pela ISO 1925:2001 como: *“That condition, which exists in a rotor when vibratory, force or motion is imported to its bearings as a result of centrifugal forces”*.

O grupo gerador, para que se apresente em óptimas condições, terá de verificar o seu eixo de rotação coincidente com o eixo de inércia sendo, portanto, o desequilíbrio uma distribuição desigual de massas em torno do eixo de rotação do grupo gerador (Figura 16). Devido a limitação dos métodos construtivos é aceitável a existência de um desequilíbrio residual.

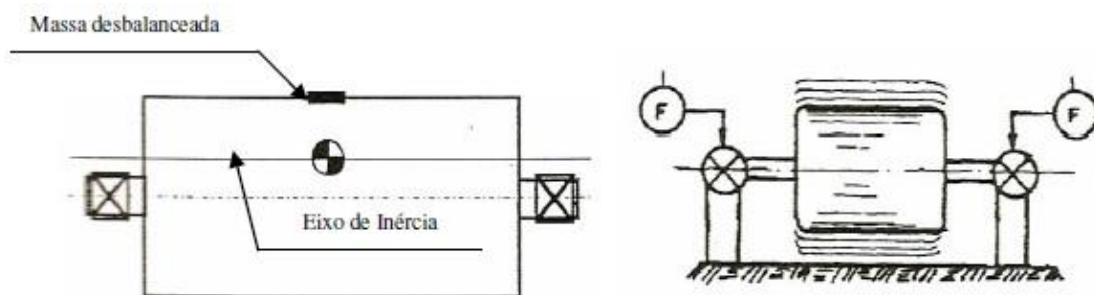


Figura 16 – Massa desbalanceada (reproduzido de Almeida, 2008)

Na Tabela 5 destacam-se algumas causas de desequilíbrio.

O desequilíbrio de um grupo gerador hídrico verifica-se numa das três partes principais: roda da turbina, veio ou rotor. Estes defeitos de equilibragem são, por norma, devido a erros de projecto, fabricação, montagem ou manutenção.

Para qualquer tipo de desequilíbrio, a frequência de rotação é identificadora deste tipo de falha. No espectro de vibração verifica-se um aumento significativo da amplitude da frequência de rotação em caso de desequilíbrio de massas no grupo gerador (Figura 17).

Em caso de elevado desequilíbrio poderá verificar-se, também, um aumento significativo de amplitude da 2ª, 3ª e 4ª harmónica da frequência de rotação (2x, 3x, e 4x rpm) (Almeida, 2008).

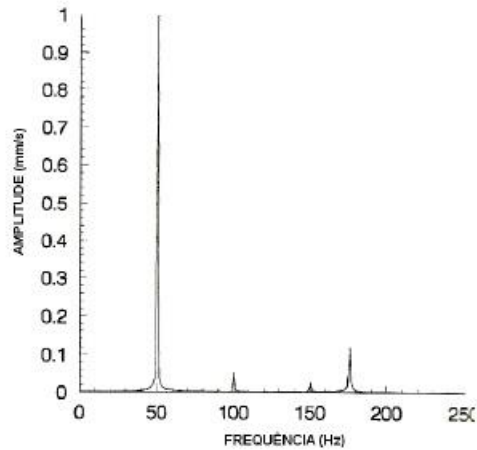


Figura 17 – Espectro de frequência característico de desequilíbrio (reproduzido de Almeida, 2008)

Tabela 5 – Causas de desequilíbrio (adaptado de Almeida, 2008)

Causa	Característica observada	Frequência de vibração
Componente excêntrico no eixo	Detectado a baixas rotações	Aumento significativo da amplitude da frequência de rotação
Acumulação de material nas pás da turbina	Vibração nas chumaceiras	Aumento significativo da amplitude da frequência de rotação
Cavitação nas pás não uniforme	Vibração nas chumaceiras	Aumento significativo da amplitude da frequência de rotação
Quebra de parte da pá da turbina	Vibração nas chumaceiras	Aumento significativo da amplitude da frequência de rotação. Impulsos podem ser observados
Pólos do rotor não fixados rigidamente	Vibração devido às forças centrífugas de massas desequilibradas	Aumento significativo da amplitude da frequência de rotação

## 5.2. Desalinhamento

O desalinhamento é, a par do desequilíbrio de massas (desbalanceamento), das maiores causas de vibração em grupos geradores hídricos.

Este problema é muito comum durante a montagem ou manutenção dos equipamentos e o facto de existirem vários acoplamentos na linha de veios dificulta o alinhamento do grupo. Outro factor causador de vibrações devido ao desalinhamento é a existência de chumaceiras auto-compensadoras e acoplamentos flexíveis dificultando o alinhamento de forma que não se criem forças excitadoras de desalinhamento.

Os desalinhamentos podem ser angulares, lineares ou combinados.

O desalinhamento angular (Figura 18) é devido ao ângulo formado entre os eixos das duas partes. Usualmente acontece em acoplamentos. Este tipo de desalinhamento é identificável no espectro de vibração através do aumento significativo da amplitude de vibração axial referente à 1ª e 2ª harmónica, 1x e 2x rpm (raramente este problema é identificável apenas com alteração de amplitude da frequência de rotação).

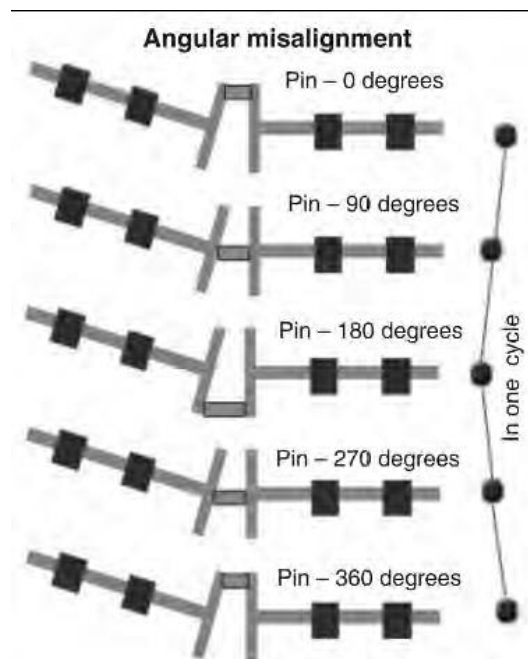


Figura 18 – Desalinhamento angular (reproduzido de Scheffer *et al*, 2004)

O desalinhamento linear é caracterizado pela falta de colinearidade entre os eixos. Este desalinhamento apresenta sintomas similares aos de desalinhamento angular mas verificável na análise de vibração radial. A identificação, neste caso, assenta predominantemente no aumento substancial de amplitude da 2ª harmónica (2x rpm), Figura 19.

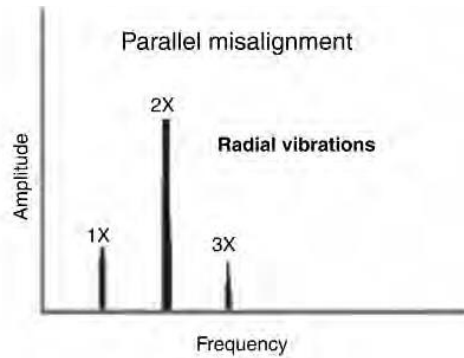


Figura 19 – Espectro de frequência característico de desalinhamento linear (reproduzido de Scheffer *et al*, 2004)

Porém, os desalinhamentos em máquinas rotativas e por conseguinte nos grupos geradores hídricos são, normalmente, compostos. São então verificáveis com os aumentos de amplitude de vibração axial da frequência de rotação e 2ª harmónica (2x rpm) e radial na frequência de rotação (Scheffer *et al*, 2004).

Os desalinhamentos podem também acontecer devido a problemas de alinhamento das chumaceiras fazendo com que o veio e a chumaceira não sejam colineares (Figura 20).

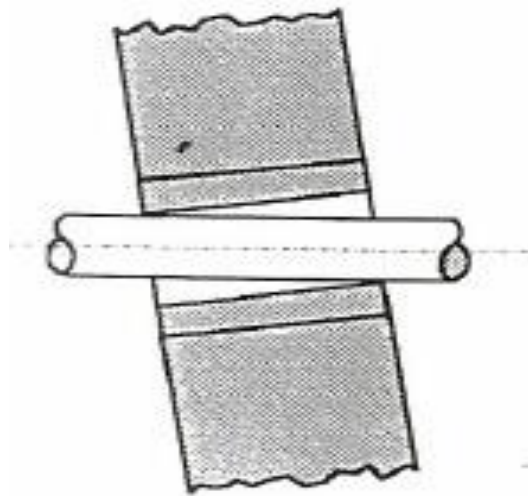


Figura 20 – Desalinhamento de chumaceira (reproduzido de Almeida, 2008)

Este caso provocará um efeito similar ao de desequilíbrio pelo que poderá ser detectado com o aumento significativo da amplitude de vibração axial e radial na frequência de rotação.

Defeito de desalinhamento do veio do grupo gerador poderá ser verificado através dos sensores de proximidade instalados gerando-se a órbita de rotação do veio. A órbita é o traçar de uma rotação



do veio correspondendo os valores de um sensor ao eixo de x e os valores do outro sensor ao eixo y, Figura 21 (Almeida, 2008).

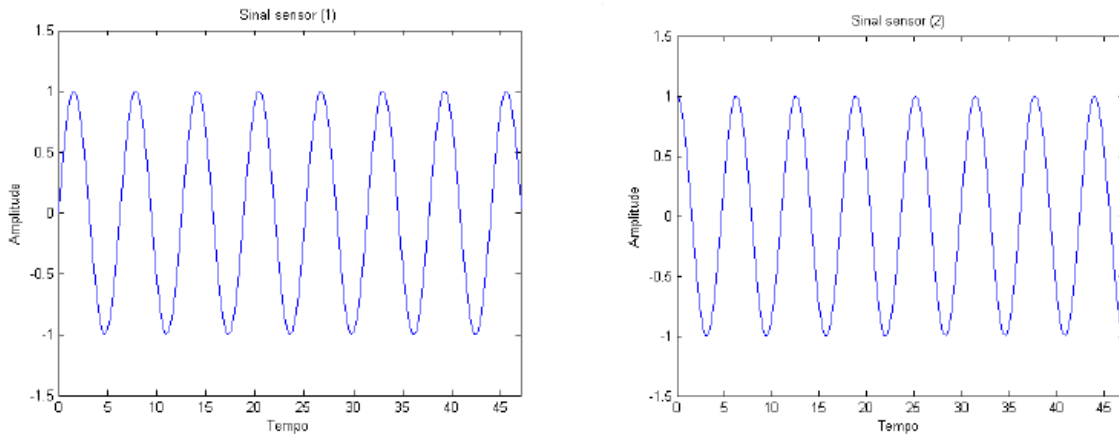


Figura 21 – Gráfico de valores de deslocamento, x e y (reproduzido de Almeida, 2008)

A órbita ideal de funcionamento seria uma circunferência perfeita passando a uma forma elíptica com o aumento do desalinhamento (Figura 22).

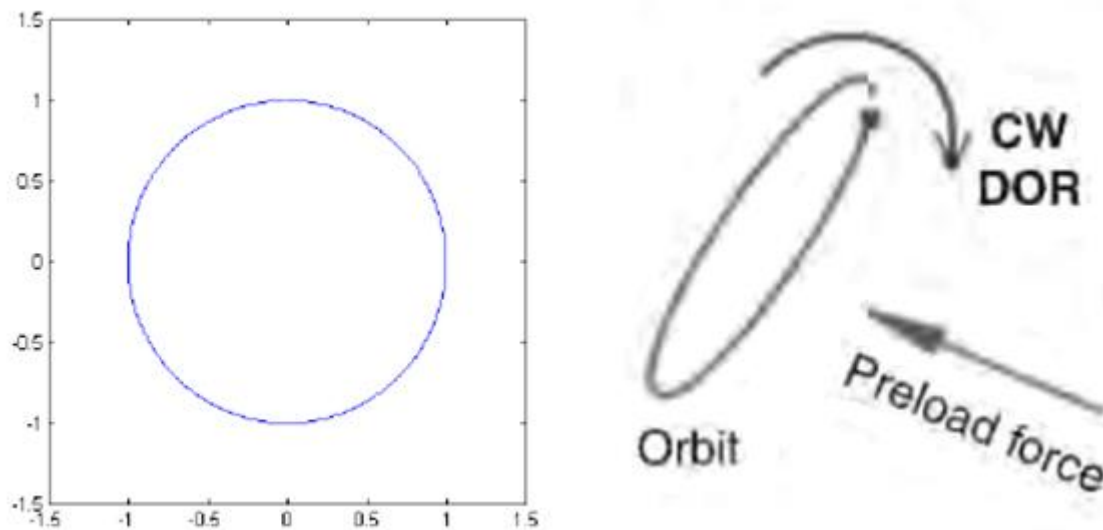


Figura 22 – Órbita perfeita (esquerda). Órbita característica de desalinhamento (direita) (adaptado de Almeida, 2008 e Scheffer *et al*, 2004)

### 5.3. Defeitos nas chumaceiras

As chumaceiras dos grupos geradores hídricos são, normalmente, de deslizamento/fricção e quando se encontram num estado deficitário são causadoras de vibrações nefastas aos grupos geradores hídricos. Os defeitos das chumaceiras podem ser devido a folgas excessivas e lubrificação.

As folgas excessivas nas chumaceiras reduzem a capacidade de absorção de forças dinâmicas, vibração lateral, causando assim um aumento de vibrações nos grupos geradores. Um correcto alinhamento da linha de veios e a equilibragem correcta do grupo gerador são factores importantes para que o desgaste das chumaceiras seja reduzido. Chumaceiras com folgas excessivas apresentam uma série de harmónicas da frequência de rotação que poderá chegar a 10x ou 20x da frequência de rotação (Scheffer *et al*, 2004).

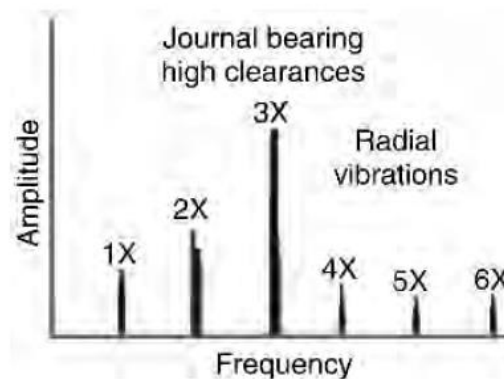


Figura 23 – Espectro de frequência característico de folgas excessivas em chumaceiras de deslizamento (reproduzido de Scheffer *et al*, 2004)

As folgas das chumaceiras, radiais (Figura 23) e axiais podem também ser avaliadas através dos dados fornecidos pelos sensores de proximidade na verificação de um aumento global do deslocamento.

Os problemas a nível de lubrificação poderão ser causados por deficiência desta e por um fenómeno conhecido por *whirl oil*.

O fenómeno *whirl oil* está associado a chumaceiras com lubrificação forçada e, por norma, de altas velocidades de rotação. A vibração deste fenómeno é facilmente identificada porque esta revela-se numa gama de frequência bastante característica, entre as frequências de 0,42 a 0,48x rpm (Figura 24), e que geralmente é severa. A vibração é considerada excessiva quando as amplitudes de deslocamento ultrapassam 50% da folga das chumaceiras.

Este fenómeno acontece devido às diferenças de velocidade do fluido relativamente ao veio acompanhado da folga existente entre o veio e a chumaceira. Verifica-se um esmagamento do fluido, por parte do veio, contra a chumaceira criando uma diferença de pressões da parte superior e inferior originando um rodopio do óleo (Figura 25).

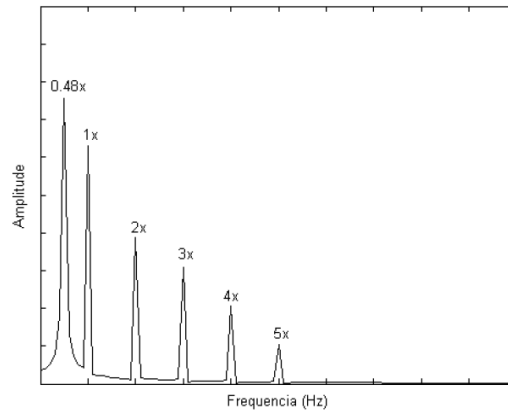


Figura 24 – Espectro de frequência característico de *whirl oil* (reproduzido de Almeida, 2008)

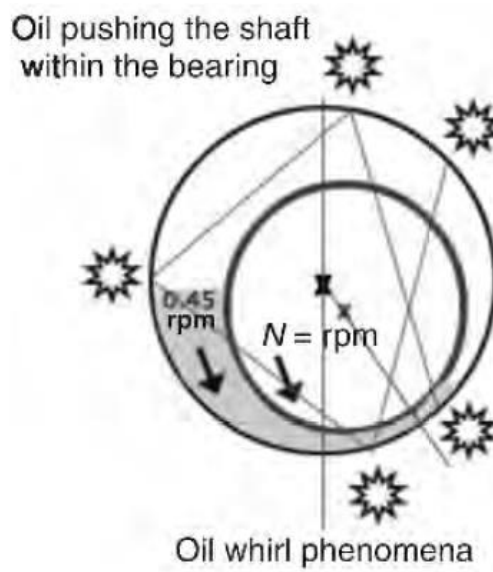


Figura 25 – Ilustração do fenômeno *whirl oil* (reproduzido de Scheffer *et al*, 2004)

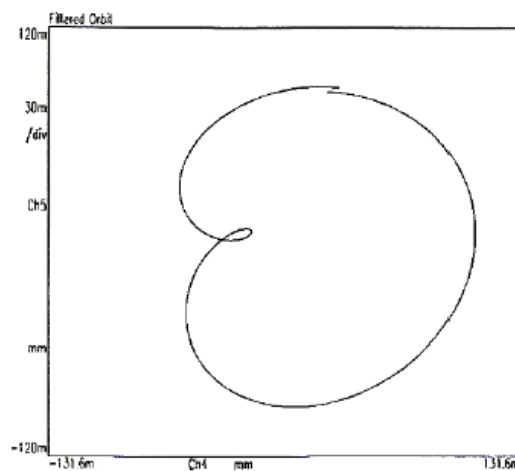


Figura 26 – Órbita característica de *whirl oil* (reproduzido de Almeida, 2008)

Este fenómeno poderá também ser diagnosticado através da elaboração da órbita. A excitação do rodopio ou espirro de óleo caracteriza a órbita por uma espécie de *loop* (Figura 26).

A lubrificação deficitária nas chumaceiras é também causadora de problemas de vibração. Estas podem ser devido a:

- Lubrificante incorrecto;
- Bombeamento de óleo insuficiente, quer por má bombagem quer por obturação de canais;
- Sistema de lubrificação mal dimensionado.

A má lubrificação poderá levar a roçamentos, *dry whirl*, que são extremamente problemáticas para as chumaceiras podendo mesmo levar ao colapso dos casquilhos destas (Scheffer *et al*, 2004).

#### 5.4. Cavitação

A cavitação é das principais causas impulsionadoras de intervenções de manutenção à roda da turbina.

A cavitação é a implosão de bolhas nas pás da turbina. Esta implosão é explicada pelo abaixamento de pressão até à pressão de vapor saturado formando desta forma bolhas de ar que quando impactam com a roda da turbina colapsam abruptamente. O colapso das bolhas, por exponencial aumento de pressão, nas zonas de contacto, pode ultrapassar o limite de resistência do material levando mesmo ao arrancamento de material da roda da turbina.

A cavitação tem, inerentemente, efeitos indesejáveis além do arrancamento de partículas, ou erosão, da roda da turbina. O ruído causado pela cavitação é característico desse fenómeno e bastante desagradável para um local de trabalho. Este fenómeno é também caracterizado por um aumento de vibração na turbina (Ezeasor, 2010).

## PARTE IV – APLICAÇÃO



## 1. INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda de uma forma directa e prática tarefas que foram desenvolvidas de acordo com a contextualização do estágio no Centro de Produção Cávado-Lima. Este capítulo aborda assuntos relacionados com a monitorização de vibrações em algumas vertentes diferentes.

Inicialmente, e por se ter considerado pertinente, é feita uma caracterização dos grupos geradores da central de Caniçada em especial aos seus acoplamentos. Esta caracterização tem por finalidade uma abordagem mais prática de detalhes de montagem/desmontagem que poderão ser causadores de vibrações indesejáveis no grupo gerador.

Seguidamente, e indo de encontro à denominação desta dissertação, é feito o estudo de implementação de manutenção preditiva à Central de Caniçada.

Durante o decorrer do estágio foram verificados vários problemas associados aos sistemas de monitorização de vibrações e consequente inoperacionalidade pelo que é feita uma caracterização geral dos sistemas de monitorização das várias centrais e apresentadas propostas de melhorias imediatas por forma a colocar os vários sistemas em operacionalidade.

Contudo, e para corroborar a dissertação de mestrado, é também apresentado e discutido, com base nos fundamentos teóricos da dissertação, um ensaio de vibrações realizado durante o estágio numa central do Centro de Produção Cávado-Lima.

O último ponto deste capítulo aborda uma iniciativa proposta durante o estágio para tornar os sistemas de monitorização de vibrações das várias centrais operacionais e eficientes. Salienta-se que esta iniciativa que se apresentada integra a carteira de iniciativas Lean do Centro de Produção Cávado-Lima.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DOS GRUPOS GERADORES DA CENTRAL DE CANIÇADA

A Central de Caniçada, em serviço desde 1955, está equipada com 2 grupos geradores com turbinas do tipo Francis de seu fabricante J. M. Voith (Figura 27).



Figura 27 – Grupo gerador J. M. Voith da central de Caniçada (adaptado de Brochuras dos Centros Produtores EDP, 2011)

Cada grupo gerador tem as seguintes características técnicas:

- Turbina: Francis, eixo vertical;
- Potência nominal: 31 MW;
- Velocidade nominal: 300 rpm;
- Caudal útil nominal: 34 m<sup>3</sup>/s;
- Queda bruta máxima: 121 m;
- Queda bruta mínima: 77 m;
- Potência parente nominal: 34 MVA;
- Tensão nominal: 10,25 kV;
- Produtibilidade média anual: 345 GWh;
- Chumaceira de impulso: 8 patins axiais;
- Chumaceira guia superior do alternador: casquilho;
- Chumaceira guia inferior do alternador: casquilho;
- Chumaceira guia da turbina: casquilho;
- Distribuidor: 20 directrizes;
- Roda: 13 pás;
- Modos de funcionamento: gerador.

Apresenta-se na Figura 28 um esquema geral do grupo gerador.



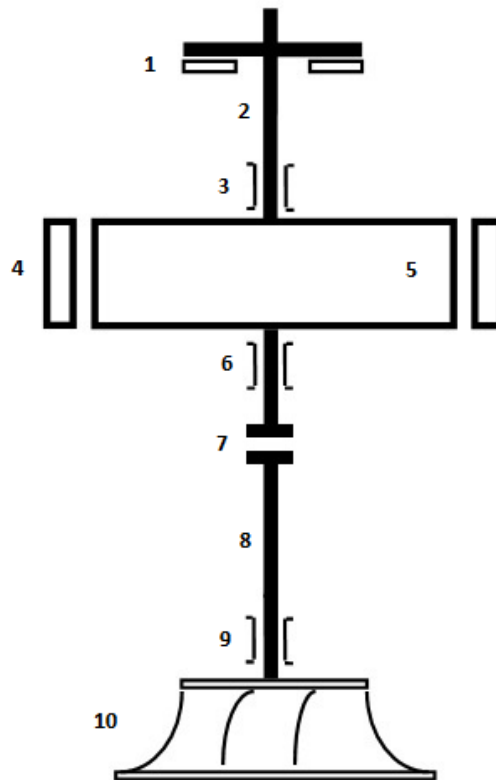


Figura 28 – Esquema de grupo gerador da central de Caniçada. 1) Chumaceira de impulso; 2) Veio superior; 3) Chumaceira guia superior do alternador; 4) Estator; 5) Rotor, 6) Chumaceira guia inferior do alternador; 7) Acoplamento; 8) Veio inferior; 9) Chumaceira guia da turbina; 10) Roda

### 2.1. Acoplamentos principais

Os grupos geradores são equipados de acoplamentos removíveis para montagem e desmontagem. A montagem de um grupo gerador exige o alinhamento cuidadoso da linha de veios para evitar vibrações. A folga admissível nas chumaceiras da central de Caniçada é de 0,4 mm enquanto as folgas no alinhamento são, por norma, inferiores a 0,1 mm.

Os acoplamentos são críticos para o alinhamento da linha de veios, existindo em cada grupo gerador da central de Caniçada 4 acoplamentos a referir, ver Figura 28:

- Turbina – veio inferior;
- Veio inferior – veio superior;
- Veio superior – jante do rotor;
- Veio superior – manchão/lentilha.

Cada acoplamento tem características específicas, especialmente perante a forma de ligação entre os seus componentes.

### 2.1.1. TURBINA – VEIO INFERIOR

O acoplamento entre o veio inferior e a roda da turbina é feito face a face com ligação por aparafusamento. Existe também uma chaveta de transmissão de momento de torção para no movimento de rotação os parafusos não sofram tensões de corte.

### 2.1.2. VEIO INFERIOR – VEIO SUPERIOR

O acoplamento do veio inferior ao veio superior (ponto 7 da Figura 28) é feito também por intermédio de ligação aparafusada, de 10 parafusos, cada um com 104mm de diâmetro, distribuídos simetricamente pelo veio. Na Figura 29 é visível parte do desenho técnico onde se verifica pormenores do veio superior deste acoplamento.

Neste caso o momento de torção é absorvido pela força de atrito entre as duas flangea pelo que os parafusos estão montados com o binário suficiente que cria essa força de atrito.

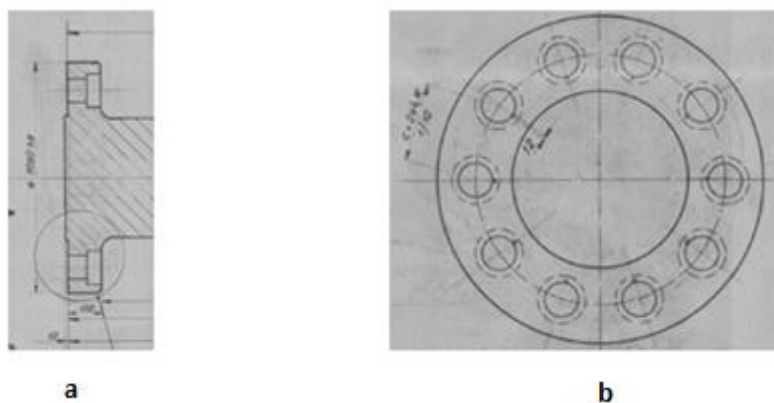


Figura 29 – Veio na zona de aparafusamento entre veios (adaptado de desenho técnico EDP). a) Vista em corte longitudinal; b) Vista de cima

### 2.1.3. VEIO SUPERIOR – JANTE DO ROTOR

O acoplamento do veio superior à jante do rotor é feito por chavetas e interferência entre diâmetros. A jante rotórica é aquecida e posteriormente colocada no veio. Com o arrefecimento do

órgão e através de chavetas ambos os órgãos tornam-se solidários. Na imagem seguinte, Figura 30, é visível o posicionamento da jante do rotor no veio e o enchavetamento.

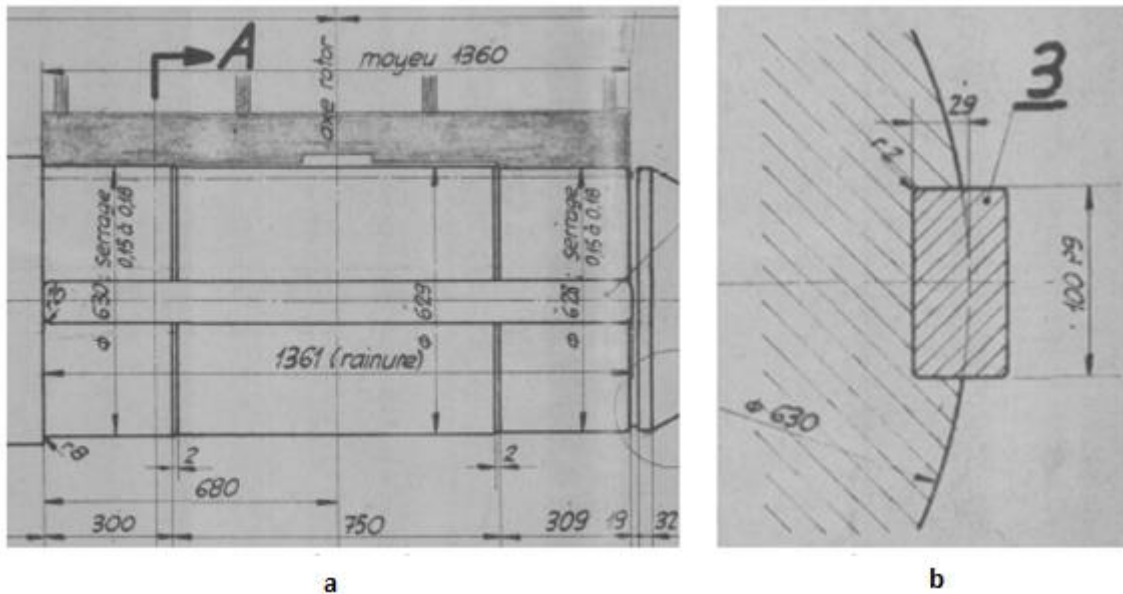


Figura 30 – a) Desenho, em corte longitudinal, de veio, jante rotórica e chaveta; b) Desenho, em corte transversal, de pormenor da chaveta (adaptado de desenho técnico EDP).

O conjunto, estando solidário, fica para efeitos de manutenção como se fosse uma peça única, o que não acarreta preocupações a nível de manutenção deste acoplamento.

#### 2.1.4. VEIO SUPERIOR – MANCHON/LENTILHA

O *manchon* e a lentilha são componentes colocados na extremidade superior do veio para suporte de todo o grupo gerador. Poderiam ser uma peça única mas, como a lentilha é propícia a desgaste pelo contacto com os patins axiais, foram projectados em peças separadas.

A lentilha sendo um órgão independente em relação ao *manchon* permite a substituição sem desaproveitar o *manchon* mas, existe a necessidade de desmontagem deste. O acoplamento da lentilha ao *manchon* é feito por aparafusamento.

O *manchon*/lentilha é o órgão que suporta o grupo gerador. Todo o grupo gerador (roda, linha de veios e alternador) está suspenso neste órgão. O acoplamento deste órgão é feito por interferência de diâmetros. Posteriormente é colocado um anel de escora bipartido na parte superior do *manchon* e um outro de retenção assegurando assim a posição do *manchon* relativamente ao veio.

Na figura seguinte, Figura 31, ilustra-se o *manchon* e lentilha numa peça única.

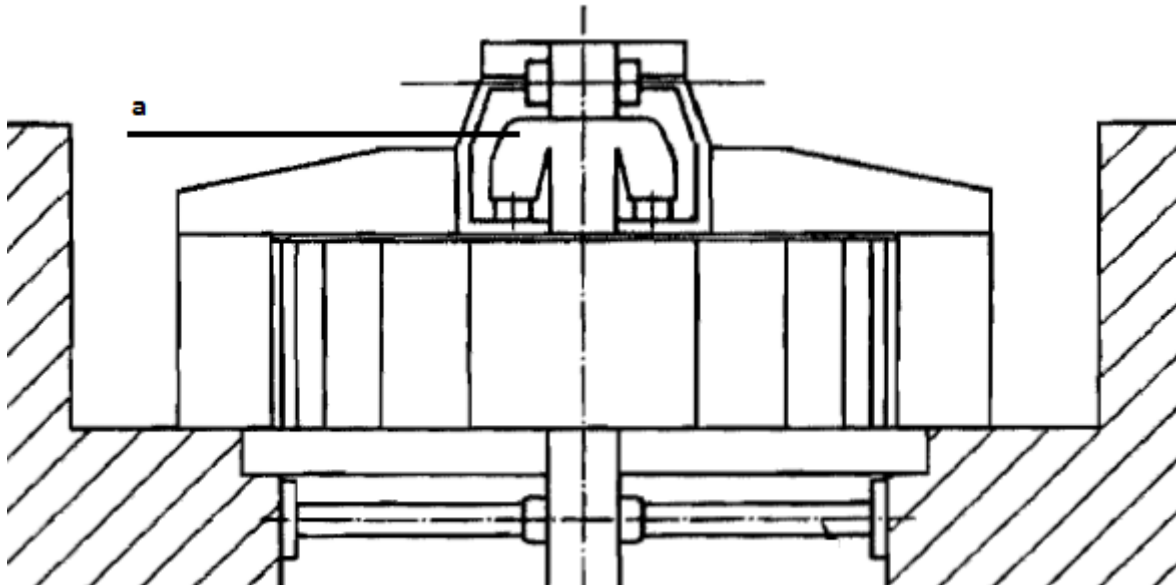


Figura 31 – *Manchon* e lenticula - a, (adaptado de ISO 10816-5)

Destaca-se, uma vez mais, a importância da qualidade das superfícies de acoplamento como do alinhamento do grupo e sua excentricidade. Qualquer desalinhamento é maximizado no comprimento da linha de veios do grupo gerador.

### 3. IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA, ATRAVÉS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO, NA CENTRAL DE CANIÇADA

A central de Caniçada foi o local escolhido para uma aproximação prática do estudo aos sistemas de monitorização de vibrações e conseguinte estudo de implementação de técnicas preditivas.

Esta escolha é justificada fundamentalmente devido à proximidade do local de desenvolvimento do trabalho, edifício sede do Centro de Produção Cávado-Lima. Esta proximidade, cerca de 500 metros, permite deslocações espontâneas de visita aos equipamentos da central e observação do equipamento de monitorização e protecção de vibrações.

Este estudo prático contempla uma descrição exaustiva do sistema de monitorização e protecção de vibrações e respectiva crítica ao sistema. Nessa crítica ao sistema são discriminadas as suas valências e problemas devidamente justificados. A proposta de melhoria ao sistema e o

redesenhar do sistema, partindo dos equipamentos existentes que são de grande valor tecnológico é a última parte desta aproximação prática, ou seja, a transformação de um sistema de simples monitorização e protecção num sistema direccionado à manutenção preditiva.

### 3.1. Caracterização do sistema de monitorização e protecção de vibrações da central de Caniçada

A central da Caniçada está equipada com um sistema de monitorização e protecção de vibrações desde 2003.



Figura 32 – Fotografia do sistema de monitorização de vibrações (rack e computador)

O equipamento instalado é um sistema da Vibro-Meter, modelo VM600 MPS, totalmente flexível, quer do ponto de vista físico (hardware) quer do ponto de vista da configuração do sistema (software), arquitectura industrial aberta para comunicação Standard, com protocolo de transmissão de dados, apresentando-se como um sistema modular e escalonável com vários tipos de configuração. O sistema pode ser operado em modo independente, para protecção, com ou sem display local.

O sistema instalado é vocacionado para a protecção do grupo gerador, ou seja, está parametrizado com alarmes e disparos obrigando o grupo gerador a paragens de emergência se os limites impostos forem ultrapassados. No entanto, os disparos não estão activos por decisão superior.

O equipamento encontra-se num armário, Figura 32, que sita na sala de máquinas à cota de 50,9 metros.

O sistema instalado é composto por vários componentes, sendo eles:

- “Rack de 19” – Chassis Modelo 6U, **ABE040**;
- 2 Cartas de alimentação, **RPS 6U**;
- 6 Cartas de processamento e protecção, **MPC 4**;
- 6 Cartas de entradas/saídas, **IOC4T**;
- 4 Cartas de relés (cada com 16 relés), **RLC16**;
- 1 Carta de comunicação/configuração/display, **CPU M**;
- 1 Carta de ligação Ethernet, **IOC N**;
- 8 Acelerómetros, **SE 120**;
- 14 Sensores de proximidade, **TQ 402**;
- 14 Condicionadores de sinal, **IQS 450**;
- Caixas de junção; **ABA 151 e JB 116**;
- Cablagens;
- 1 Computador;
- Software Machinery Protection Systems, **MPS**.

No Apêndice I apresentam-se características destes componentes.

### 3.1.1. LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DE PROXIMIDADE E ACELERÓMETROS NO GRUPO GERADOR

Os sensores estão localizados nas chumaceiras, como ilustrado na Figura 33.

Os acelerómetros têm por função a medição de vibração em termos absolutos estando portanto instalados em zonas estacionárias. Por outro lado, os sensores de proximidade medem os deslocamentos radiais do veio em cada eixo (x e y).

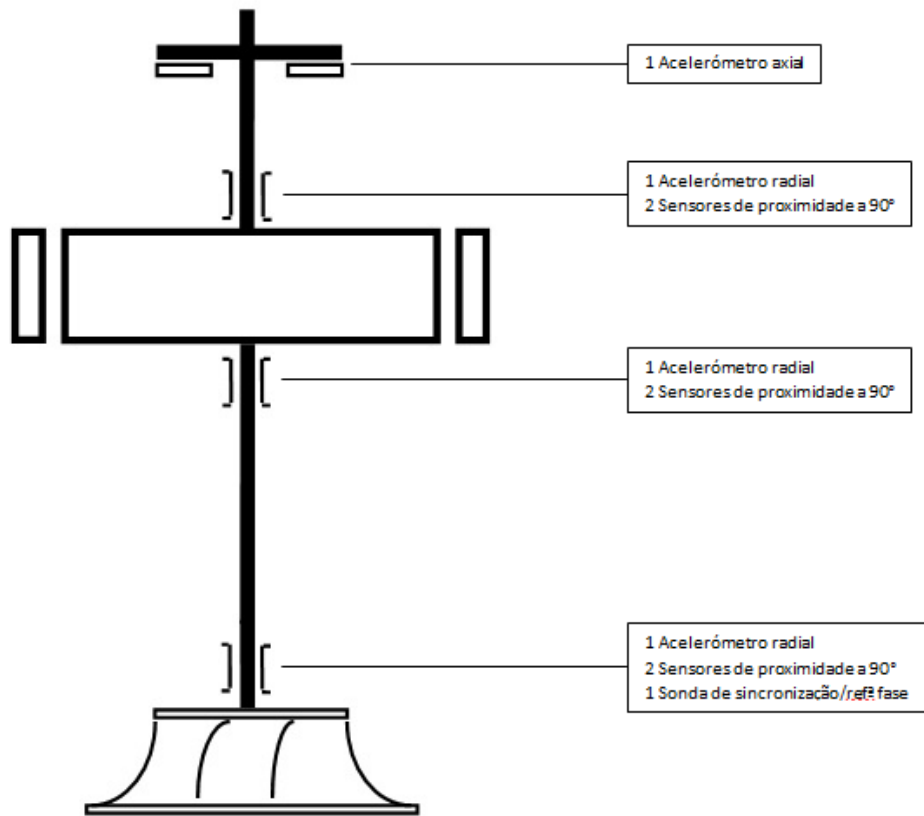


Figura 33 – Esquema de localização dos sensores/acelerómetros

A fixação dos sensores de proximidade e acelerómetros é feita por aparafusamento numa chapa rígida acoplada a uma base imóvel, ver Figura 34.

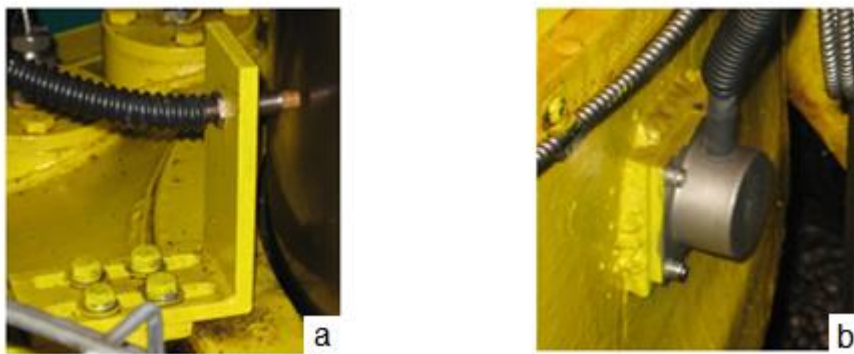


Figura 34 – Fotografias da fixação: a) sensor de proximidade; b) acelerómetro

### 3.1.2. DETECÇÃO DE OCORRÊNCIA DE PERIGO

A detecção de ocorrência de perigo é feita pelo accionamento de alarmes e disparos.

Os alarmes e disparos estão configurados de acordo com as necessidades. O programa de monitorização e protecção de vibrações permite o ajustamento do nível dos alarmes por alteração da programação na definição de parâmetros. No Apêndice III, apresentam-se os principais alarmes definidos para cada grupo gerador.

O sistema de monitorização de vibrações está documentado para que os colaboradores da empresa possam actuar sobre ele quer a nível físico quer de programação. Todos os diagramas eléctricos, electrónicos e mecânicos estão identificados tal como instruções de manuseamento do programa (em português). Existem também os manuais de utilização completos do sistema VM600, em inglês.

### 3.1.3. DISCUSSÃO

O sistema de monitorização e protecção de vibrações instalada na central de Caniçada é um sistema vocacionado para protecção do grupo gerador. Tem como função a leitura dos sensores instalados (sensores de proximidade e acelerómetros), análise e actuação para o caso dos valores máximos de vibração parametrizados sejam ultrapassados.

O computador tem uma memória de 480 MB, embora a funcionar correctamente, torna o processamento um pouco moroso porque trata-se de equipamento antigo e o seu sistema operativo é o Windows 98 tornando a compatibilidade com equipamentos e software actuais mais difícil.

A manutenção sistemática que opera no Centro de Produção Cávado-Lima não contempla o sistema de monitorização e protecção de vibrações no seu leque de operações programadas, e o armazenamento dos dados pelo computador dedicado ao sistema falha. No entanto esta falha não invalida a eficiência na protecção do grupo gerador, pois o sistema VM600 tem a capacidade de operacionalidade de protecção em regime individualizado.

O sistema VM600 MPS instalado não é o mais apropriado para uma filosofia de manutenção preditiva. Apesar de haver um armazenamento de dados utilizando o programa MPS, considera-se que os dados recolhidos não são suficientes para conclusões fundamentadas aplicadas em manutenção preditiva. O programa MPS é apropriado para a análise no domínio do tempo o que não se identifica como a técnica apropriada para a identificação de falhas nos grupos geradores em que os espectros de frequência fornecem informação de qualidade no domínio da análise de vibrações pois, em capítulos



anteriores foram demonstrados os espectros de frequência típicos das falhas comuns nos grupos geradores relativamente aos aumentos de amplitude para a frequência de rotação suas harmónicas e sub-harmónicas.

Um outro aspecto a referir é a falta de ligação à rede intranet EDP. A ligação destes equipamentos rede intranet EDP teria vantagens significativas relativamente ao controlo e análise de vibrações remotamente.

### **3.2. Redesign do sistema de monitorização e protecção de vibrações da central de Caniçada**

Neste ponto pretende-se propor alterações ao sistema de monitorização e protecção de vibrações instalado, optimizando-o à utilização dos dados fornecidos por este sistema para a implementação de uma filosofia de manutenção preditiva ao grupo gerador.

A alteração fundamental no sistema de monitorização e protecção de vibrações da central de Caniçada para a implementação de manutenção preditiva ao grupo gerador assenta na beneficiação do sistema de modo a capacitá-lo para que a análise no domínio de frequência seja uma realidade.

Comummente poderão utilizar-se duas técnicas fundamentais de diagnóstico de falhas que são a análise do espectro de vibração e a análise de ângulo de fase de vibração. A inclusão dessas técnicas de diagnóstico no sistema de monitorização de vibrações acarreta vantagens de eficiência dos grupos geradores promovendo um planeamento de manutenção em contínuo possibilitando o controlo mais eficaz da vida útil dos equipamentos.

O equipamento de monitorização de vibrações instalado na central de Caniçada, apenas permite a monitorização de protecção dos grupos geradores, constituído pelo modelo VM600 MPS (Machinery Protection System) restringindo portanto a uma análise no domínio do tempo. Adquirindo o equipamento VM600 CMS (Condition Monitoring System) será possível adoptar uma metodologia de manutenção preditiva.

O sistema de monitorização de condição, Condition Based System (CMS), é o equipamento que permite manutenção preditiva permitindo aumentar a segurança, disponibilidade e eficiência dos equipamentos monitorizados.

Para se conseguir esta valência no equipamento deverá combinar-se um conjunto de cartas às já existentes. São elas: CMC16 e IOC16T.

Para permitir a análise baseada na condição é utilizado o programa CMS.

No Apêndice II apresentam-se as características das cartas e programa mencionados.

### 3.3. Combinação dos sistemas MPS e CMS

A combinação de um sistema integrado em protecção e monitorização de protecção satisfaz as mais altas exigências de máquinas rotativas críticas.

O equipamento VM600 integrando a análise de vibração e a monitorização de condição é a solução para máquinas rotativas críticas com o seu módulo de protecção agindo em conformidade com a parametrização que é configurada, e é usado para a precoce identificação e desenvolvimento de falhas usufruindo do módulo de monitorização de condição, optimizando a performance e melhorando os planos de manutenção.

Reverendo tudo o que foi anteriormente referido, facilmente se deduz que os dois sistemas (MPS e CMS) partilham grande parte dos equipamentos. O que distingue os dois sistemas são os pares de cartas MPS/IOC4T e CMC/IOC16T. O software é também diferente, podendo ambos os software “correrem” em simultâneo no computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações.

Na Tabela 6, mostram-se os componentes comuns e individuais a cada um dos sistemas com base no sistema implementado na central de Caniçada com a combinação do sistema de monitorização de condição.

Tabela 6 – Componentes dos sistemas MPS e CMS

Genérico	MPS	CMS
ABE 040	MPC 4	CMC 16
RPS 6U	IOC 4T	IOC 16T
CPU-M	RLC 16	Software CMS
IOC-N	Software MPS	
SE 120		
TQ 402		
IQS 450		
ABA 151		
JB 116		
Computador		

### 3.3.1. COMBINAÇÃO DO SISTEMA MPS E CMS NO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES DA CENTRAL DE CANIÇADA

A implementação do sistema CMS no equipamento VM600 MPS instalado na central de Caniçada carece de algumas alterações.

As alterações a efectuar são a adição do par de cartas CMC16/IOC16T que funcionam com os restantes equipamentos. Os sinais de entrada, na carta IOC 16T, oriundos dos sensores e acelerómetros são colocados nos terminais por aparafusamento do fio da cablagem. No entanto, como os sinais já se encontram a dar entrada na carta IOC 4T e para evitar a utilização de mais cablagens, pode ser utilizada uma raw bus ou tacho bus para efectuar a ligação.

A instalação do programa CMS é também uma necessidade. A instalação e funcionamento do programa CMS em nada prejudicam o funcionamento do programa MPS passando os dois programas a funcionar em simultâneo.

Porém, para que isto seja possível é necessário que o computador seja substituído pois o que se encontra em funcionamento não preenche os requisitos mínimos pois, o sistema operativo instalado é o Windows 98 que é incompatível com o programa CMS. A proposta seria a utilização do sistema operativo Windows XP pelo facto de ser o mais actualizado compatível com os programas de protecção e monitorização da condição.

A implementação destas duas cartas adicionais, CMC 16 e IOC 16T, para a optimização do sistema de monitorização de vibrações para a implementação de manutenção preditiva tem um custo expectável de 12 500€(custo do par de cartas).

## 4. MONITORIZAÇÃO E PROTECÇÃO DE VIBRAÇÕES DOS GRUPOS GERADORES DO CENTRO DE PRODUÇÃO CÁVADO-LIMA

No Centro de Produção Cávado-Lima constam de 8 centrais hídricas de produção em regime ordinário (PRO) e que estão equipadas com sistemas de monitorização e protecção de vibração.

Os sistemas de monitorização e protecção de vibrações instalados em cada uma das centrais, apesar de serem oriundos de modelos e/ou marcas diferentes, não apresentam diferenças significativas. O sistema predominante é o modelo VM600 da Vibro-Meter.

Convém destacar que todos os sistemas implementados no Centro de Produção Cávado-Lima são programados e adaptados à medida para grupos geradores hídricos da central de implementação.

#### 4.1. Caracterização do estado de funcionamento dos equipamentos de monitorização e protecção de vibrações, das centrais do Centro de Produção Cávado-Lima

Este subcapítulo destina-se a uma caracterização abrangente a todas as centrais de produção em regime ordinário (PRO) relativamente aos seus sistemas de monitorização e protecção de vibrações.

A caracterização do estado de funcionamento será generalizada apontando sobretudo para o modelo e fabricante do sistema, problemas existentes e proposta de melhorias imediatas para que o normal funcionamento não seja prejudicado.

Tabela 7 – Características gerais das centrais em PRO

Central	Potência instalada (MW)	Nº grupos gerador/bomba	Tipo de turbina	Data de início de exploração	Data de instalação SMV
AL	630	2/0	Francis	1992	1997
AR	68	2/2	Francis	1964	1998
CD	62	2/0	Francis	1954	2003
FD	191,4	2/2	Francis	2005	2005
SD	42	2/0	Francis	1653	2002
TD	22	1/0	Kaplan	1993	2003
VN	144	4/0	Francis (1) e Pelton (3)	1951 (3) e 1956 (1)	1998 (Francis) e 2010 (Pelton)
VF	125	2/1	Francis	1972 e 1987	

As centrais hídricas abrangidas por este regime de funcionamento são 8 em que uma delas recebe o fornecimento de água de dois aproveitamentos hídricos diferentes. O Centro de Produção Cávado-Lima apresenta as seguintes centrais em PRO:

- Alto Lindoso, AL;
- Alto Rabagão, AR;
- Caniçada, CD;
- Frades, FD;

- Salamonde, SD;
- Touvedo, TD;
- Vila Nova, VN;
- Vilarinho das Furnas, VF.

Na Tabela 7 pode observar-se a caracterização geral das várias centrais em que se destaca a data de instalação dos sistemas de monitorização de vibrações (SMV).

Na Tabela 8 pode observar-se algumas características gerais que foram recolhidas aquando de uma campanha de verificação de funcionamento dos sistemas de monitorização e protecção d vibrações dos grupos geradores.

Tabela 8 – Características gerais dos SMV

Central	Marca (modelo)	Funcionamento rack	Funcionamento computador	Sistema operativo	RAM
AL	Vibro Systems (PCU100)	Sim	Sem computador	-	-
AR	Vibrometer (VM600)	Sim	Sim	Windows XP	3 GB
CD	Vibrometer (VM600)	Sim	Sim	Windows 98	480 MB
FD	Bruel Kjaer (Vibrocontrol 4000)	Sim	Sem computador	-	-
SD	Vibrometer (VM600)	Não	Sim	Windows 98	128 MB
TD	Vibrometer (VM600)	Sim	Não	-	-
VN	Vibrometer (VM600)	Sim	Sim	Windows XP	2 GB
VF	Vibrometer (VM600)	Sim	Não	-	-

Uma conclusão preliminar é o mau estado de conservação de praticamente todos os sistemas. Mesmo os sistemas mais recentes não se encontravam em funcionamento pleno por se verificar que alguns computadores dedicados estavam desligados impedindo, deste modo, a recolha e armazenamento de dados. Verifica-se que há um abandono de cuidados a reter para o funcionamento dos sistemas.

Deste modo, há a necessidade de repor a operacionalidade dos equipamentos com várias melhorias a efectuar como, por exemplo, substituição de computadores obsoletos. Na próxima secção serão propostas melhorias imediatas individualizadas a cada central para os SMV.

#### 4.2. Proposta de melhorias imediatas

Existem várias melhorias imediatas que poderão ser colocadas em prática para que os sistemas de monitorização e protecção de vibrações sejam utilizados de forma eficiente.

Verificou-se que existem problemas, não críticos, nestes sistemas e que muito provavelmente acontecem simplesmente por não haver uma rotina de verificação de funcionamento dos sistemas tal como quando foram postos em funcionamento. Por exemplo, o computador encontrar-se desligado, impedindo assim o armazenamento de leituras, é um problema que facilmente é corrigido com uma rotina inserida na manutenção sistemática implementada no Centro de Produção Cávado-Lima.

Tabela 9 – Proposta de melhorias imediatas às centrais do rio Lima

Aproveitamento	Melhoria
AL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A falta de documentação relativa ao sistema de monitorização e protecção de vibrações deve ser ultrapassada. Deverá ser feita uma caracterização pormenorizada do equipamento, manual.</li> <li>• O sistema deverá ter um computador associado permanentemente ligado para armazenamento de dados. Estes dados são extremamente úteis para análise do estado do grupo gerador.</li> </ul>
TD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O computador encontra-se com avaria, deverá ser reparado ou substituído. O computador deverá ser actualizado relativamente ao sistema operativo e memória RAM do seu sistema. O processador deverá ser igualmente actualizado.</li> </ul>

Portanto, a verificação de total funcionamento do sistema de monitorização e protecção de vibrações deverá ser inserida na manutenção sistemática.

Tabela 10 - Proposta de melhorias imediatas às centrais do rio Cávado

Aproveitamento	Melhoria
AR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O sistema operativo instalado no computador deverá ser actualizado para uma versão mais recente.</li> <li>• O acelerómetro e/ou cablagem da guia inferior do alternador deverá ser reparado, calibrado ou substituído.</li> </ul>
CD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O sistema operativo instalado no computador deverá ser actualizado para uma versão mais recente.</li> <li>• O computador deverá ser beneficiado relativamente à sua memória RAM para uma mais rápida velocidade de processamento.</li> </ul>
FD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A documentação relativa ao sistema de monitorização e protecção de vibrações deverá ser revista. Deverá ser elaborado um manual do equipamento em língua portuguesa.</li> <li>• O sistema deverá ter um computador associado permanentemente ligado para armazenamento de dados. Estes dados são extremamente úteis para análise do estado do grupo gerador.</li> <li>• Existem dúvidas relativamente às ligações dos sensores com a Rack que deverão ser esclarecidas. Deverá ser feita uma auditoria ao equipamento e respectiva correcção, se necessário.</li> </ul>
SD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deve ser configurado o IP para que a conexão entre computador e Rack seja estabelecida. O computador deverá ser actualizado relativamente ao sistema operativo e memória RAM do seu sistema. O processador deverá ser igualmente actualizado.</li> </ul>
VN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O sistema operativo instalado no computador deverá ser actualizado para uma versão mais recente.</li> </ul>
VF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta o monitor do computador, deverá ser reposto.</li> <li>• O computador deverá ser actualizado para tecnologia actual.</li> </ul>

Os sistemas de monitorização e protecção de vibrações, através dos computadores associados, deverão ser integrados na rede EDP possibilitando o controlo remotamente destes sistemas. Com isto, conseguir-se-ia um fácil acesso ao sistema para intervenções e verificações.

Nas tabelas anteriores (Tabela 9 e Tabela 10), destacam-se melhorias individuais a cada equipamento.

As melhorias propostas além de serem de razoável facilidade de implementação não acarretam grandes custos pelo que o benefício é alto. Apesar dos grupos geradores se encontrarem protegidos pelos sistemas, é fundamental acrescentar valor aos mesmos, dando mais importância aos sistemas procedendo a recolhas sistemáticas e análise de tendência de vibração conseguindo uma eficiência superior.

## 5. ENSAIO DE VIBRAÇÕES

O espaço temporal em que decorreu o estágio curricular coincidiu com uma campanha de ensaios de vibrações ao Grupo 2 da Central do Alto Rabagão, Figura 35, por ter sido verificado um aumento de vibrações.



Figura 35 – Sala de máquinas da central do Alto Rabagão

Perante a presunção de desequilíbrio de massas no grupo gerador e/ou desalinhamentos na linha de veios, os ensaios de vibrações com equipamento apropriado à obtenção de espectros de frequência serviu de despiste às presunções.



Além disso, o tipo de resultados que se consegue com o equipamento utilizado nestes ensaios são os sugeridos anteriormente para a implementação de uma metodologia preditiva na manutenção dos grupos gerados – análise de espectros de frequência e ângulo de fase.

O ensaio para caracterização do estado vibratório do Grupo 2 da central do Alto Rabagão foi realizado no dia 4 de Abril de 2013, em 5 condições distintas de funcionamento do grupo bomba-gerador:

- Vazio não excitado;
- Vazio excitado;
- 20MW;
- 30MW;
- Bomba (-30MW).

Entende-se por “vazio” que o grupo roda sem ligação à rede eléctrica.

Estas condições de ensaio são as comumente utilizadas pela empresa EDP aquando de ensaios de vibração aos grupos geradores hídricos.

### 5.1. Equipamento de aquisição de dados e localização de sensores

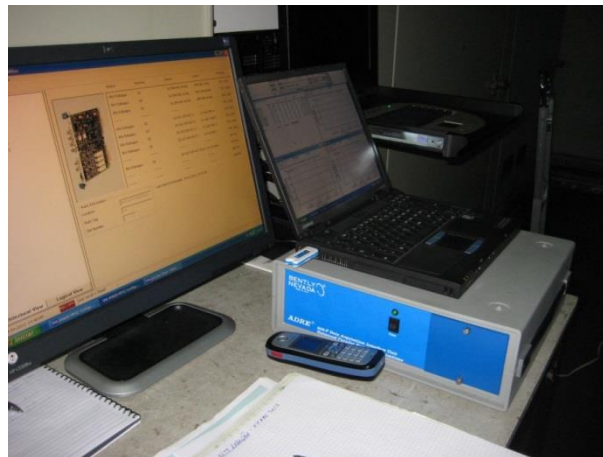


Figura 36 – Equipamento portátil e computador portátil utilizados nos ensaios da central do Alto Rabagão

Os equipamentos utilizados nesta campanha de recolha de dados de vibração (Figura 36 e Figura 37) foram:

- Sistema portátil “Adrewin” da Bently e Nevada composto por:

- Unidade de aquisição de dados, DAIU 208-P;
- Software de tratamento de dados “ADRE for Windows”;
- Computador portátil;
- Sistema permanente de Monitorização de Vibrações – VM600 da Vibrometer.



Figura 37 – Equipamentos utilizados durante os ensaios na central do Alto Rabagão (cablagens de interface entre equipamentos visível)

A Figura 38 representa esquematicamente a localização dos pontos de medição e a disposição dos equipamentos de aquisição de dados na campanha de recolha.

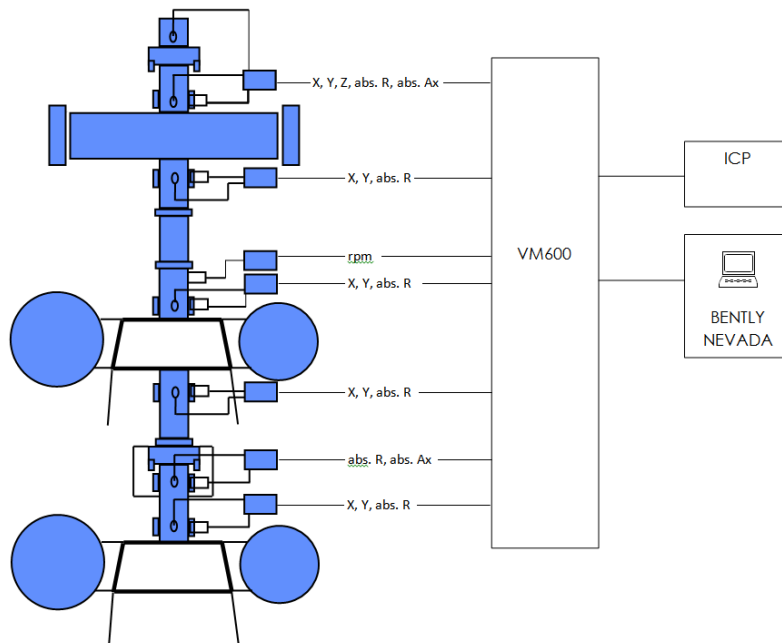


Figura 38 – Esquema de localização dos sensores e disposição dos equipamentos na central do Alto Rabagão (reproduzido de Peixoto, 2013)

## 5.2. Apresentação de resultados vibração (numéricos)

Os resultados numéricos são resultados no domínio do tempo e retirados do sistema de monitorização permanente, VM600. Estes resultados são valores pontuais retirados manualmente por observação do valor de deslocamento ou velocidade em determinado instante para determinado regime de funcionamento.

Os resultados numéricos apresentados na Tabela 11 comparam valores recolhidos numa outra campanha de medições realizada no dia 18 de Janeiro de 2012 com os resultados obtidos na campanha do dia 4 de Abril de 2013.

Tabela 11 – Resultados de medição de vibrações (reproduzido de Peixoto, 2013)

Condição de ensaio	IMPULSO		SUP. ALTERNADOR				INF. ALTERNADOR				SUP. TURBINA				INF. TURBINA					
	Z	Abs. Ax	X	Y	Smáx	Abs. R	Abs. R	X	Y	Smáx	X	Y	Abs. R	Smáx	X	Y	Abs. R	Smáx		
	µm, pk-pk	mm/s, rms	µm, pk-pk	µm, pk-pk	µm, pk	mm/s, rms	mm/s, rms	µm, pk-pk	µm, pk-pk	µm, pk	µm, pk-pk	µm, pk-pk	mm/s, rms	µm, pk	µm, pk-pk	µm, pk-pk	mm/s, rms	µm, pk		
Valores anteriores 18.01.2012																				
Vazio não excitado	274	0,6	219	275	165	1,9	–	397	384	237	471	407	0,9	272	217	214	0,9	134	Cm-863,34 Cj-695,00	
Vazio excitado	282	0,5	276	394	227	2,5	–	447	380	245	561	419	0,9	315	223	220	0,7	143		
20MW; OMVAr	258	0,7	267	390	228	2,2	–	436	363	234	492	390	0,9	273	257	353	0,6	209		
30MW; OMVAr	257	0,4	265	385	231	2,2	–	426	350	228	446	341	0,4	248	179	191	0,3	123		
Valores actuais 04.04.2013																				
Vazio não excitado	276	0,5	214	290	179	0,2	0,2	442	412	240	495	402	0,2	292	192	201	0,9	127	Cm-875,58 Cj-697,22	
Vazio excitado	265	0,4/0,6	294	403	227	0,2	0,2	443	413	251	535	414	0,2	301	200	209	0,8	125		
20MW; OMVAr	265	0,5	292	407	221	0,3	0,2	439	406	244	454	383	0,2	262	233	329	0,9	186		
30MW; OMVAr	261	0,2	286	400	228	0,2	0,2	428	385	240	435	329	0,2	235	184	231	0,4	144		
Bomba -30MW	262	0,2	275	396	228	0,2	0,2	446	415	244	501	422	0,2	280	162	170	0,4	105		
														COMB. BOMBA		GUIA BOMBA				
														Abs. Ax	Abs. R	X	Y	Abs. R	Smáx	
														mm/s, rms	mm/s, rms	µm, pk-pk	µm, pk-pk	mm/s, rms	µm, pk	
														0,6	0,1	185	183	0,2	108	

A Tabela 11 apresenta nas várias linhas os diferentes regimes de funcionamento aos quais foram realizados os ensaios. No entanto, a primeira linha representa a localização dos pontos medidos (chumaceira de impulso, superior do alternador, inferior do alternador, superior da turbina e inferior da turbina, respectivamente), a segunda linha representa o eixo de medição e a terceira linha representa as unidades de medição. Note que na linha referente aos eixos de medição, Abs.Ax e Abs.R

representam vibração absoluta axial e radial respectivamente. A última coluna faz referência ao detalhe de altura de cotas da água das albufeiras a montante e jusante (Cm e Cj respectivamente). No regime de funcionamento bomba, é inserido no canto inferior direito da tabela, valores referentes à chumaceira combinada da bomba (COMB.BOMBA) e chumaceira guia da bomba (GUIA.BOMBA).

Os grupos bomba-gerador da central do Alto Rabagão caracterizam-se por uma velocidade de rotação de 428 rpm o que perante a norma ISO 7919-5 corresponde a um deslocamento relativo máximo ( $S_{\text{máx}}$ ) admissível de 130  $\mu\text{m}$  para que o funcionamento seja aceite para operação de longo termo sem restrições. No caso da norma ISO 10816-5, para que o funcionamento seja aceite para operação de longo termo sem restrições, estabelece como valor máximo admissível de velocidade RMS 1,6 mm/s.

Fazendo uma análise aos valores actuais (Tabela 11), verifica-se que relativamente aos valores de vibração absoluta não existe qualquer problema visto que em todos os regimes de funcionamento o valor recolhido está muito abaixo do valor limite imposto pela norma ISO 10816-5. Porém, no que toca a vibrações relativas verificadas no Grupo 2 da Central do Alto Rabagão, os valores encontram-se muito acima dos recomendados pela norma ISO 7919-5 com excepção para chumaceira guia da bomba que se encontra abaixo do valor máximo admissível e a chumaceira inferior da turbina que apresenta valores muito próximos do limite admissível e até acima deste (dependendo do regime de funcionamento).

Relativamente à comparação entre valores anteriores (18 de Janeiro de 2012) e valores actuais (4 de Abril de 2013) não é possível fundamentar conclusões pois não se verifica uma tendência linear de aumento ou diminuição dos valores de vibração relativa.

### **5.3. Apresentação de resultados vibração (gráficos)**

Os resultados gráficos (vibração no domínio do tempo, espectros de frequência e ângulo de fase da vibração) são obtidos através sistema portátil de aquisição de dados “Adrewin” da Bently e Nevada (Figura 36 e Figura 37).

Estes resultados são apresentados primeiramente no domínio no tempo seguidos dos espectros de frequência para os diferentes tipos de funcionamento (gerador e bomba). Note-se que apenas serão apresentados valores de medição de 8 sensores do grupo bomba-gerador visto ser 8 canais os disponíveis no equipamento portátil de aquisição de dados.

Os ensaios realizados para os vários regimes de funcionamento foram divididos segundo o seguinte horário:

- 14:45h às 14:54h - vazio não excitado;
- 14:54h às 15:08h - vazio excitado;
- 15:08h às 15:16h - paralelo e subida de carga;
- 15:16h às 15:28h - 20MW (OMVAr);
- 15:38h às 15:45h - 30MW (OMVAr);
- 16:25h – arranque para bomba;
- 16:30h – bomba.

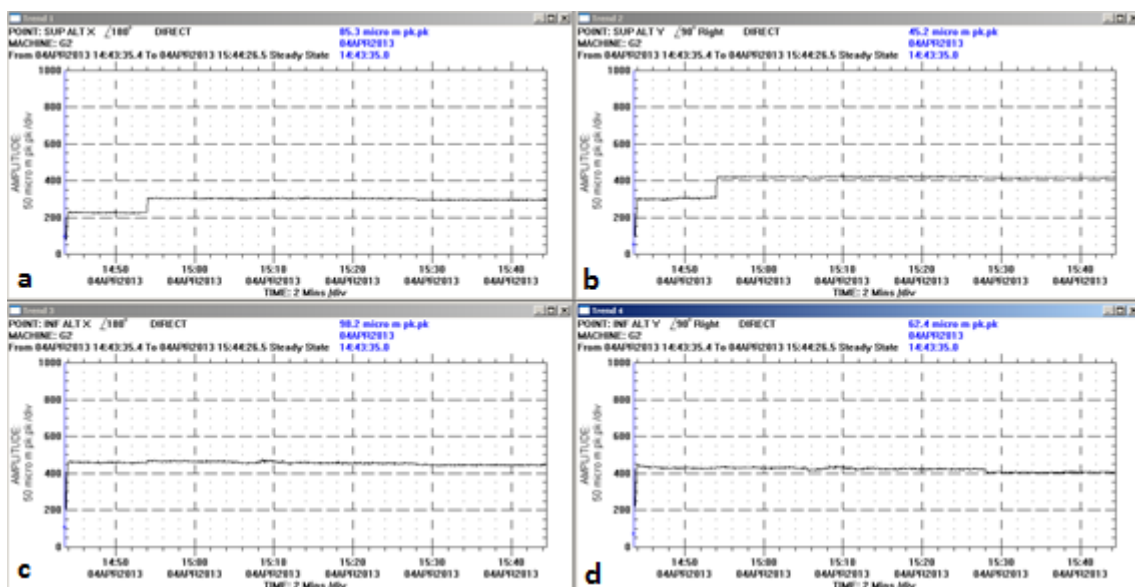


Figura 39 – Gráficos de vibração no domínio do tempo. a) Chumaceira superior do alternador no eixo x; b) Chumaceira superior do alternador no eixo y; c) Chumaceira inferior do alternador no eixo x; d) Chumaceira inferior do alternador no eixo y (adaptado de Peixoto, 2013)

Os gráficos da Figura 39 e Figura 40, mostram a variação de amplitude de vibração ( $S_{pk-pk}$ ) em relação ao tempo.

Verificando os gráficos relativos à chumaceira superior da turbina denota-se um aumento significativo da vibração relativa (cerca de 30%) no momento da excitação o que reflecte a possibilidade de um desequilíbrio magnético no grupo bomba gerador (por volta das 14:34h).

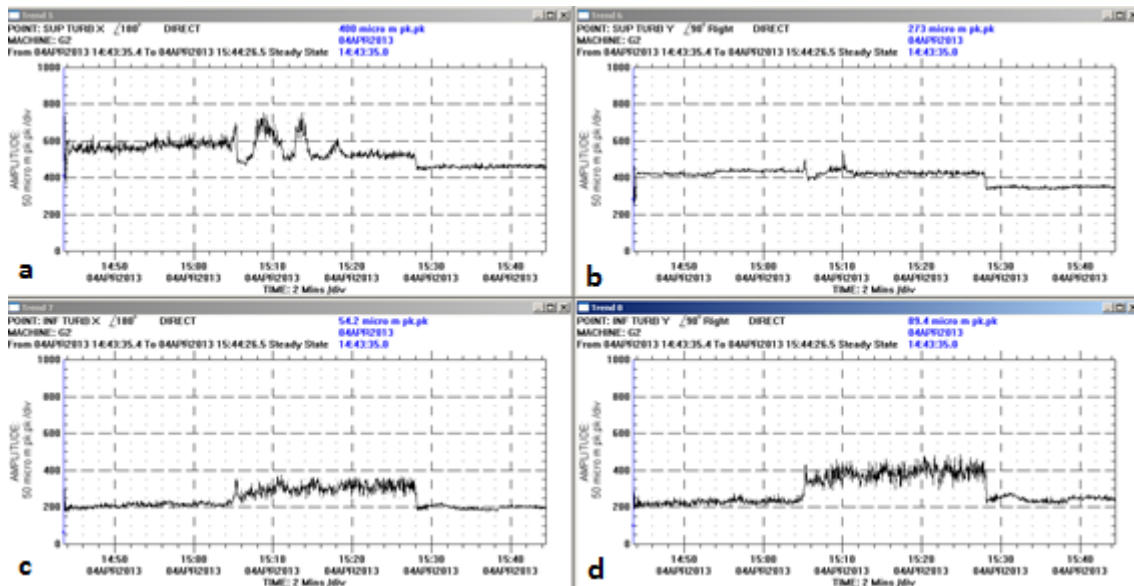


Figura 40 - Gráficos de vibração no domínio do tempo. a) Chumaceira superior da turbina no eixo x; b) Chumaceira superior da turbina no eixo y; c) Chumaceira inferior da turbina no eixo x; d) Chumaceira inferior da turbina no eixo y (adaptado de Peixoto, 2013)

Outra situação verificável nos gráficos, Figura 40, é o funcionamento instável aquando do aumento de carga e funcionamento a cargas médias (neste caso, 20MW pelas 15:16h) sendo que à carga máxima, 30MW (15:38h), os valores de vibração relativa descem ligeiramente. Esta situação, valores de vibração mais elevados a cargas médias, verifica-se nos sensores da chumaceira superior e inferior da turbina o que poderá indiciar fenómenos de cavitação quando o grupo opera em regimes de carga parcial.

### 5.3.1. MODO DE FUNCIONAMENTO: GERADOR

Apenas será apresentado o resultado do ensaio de medição de vibrações para o regime de funcionamento a 20MW podendo os restantes resultados ser consultados nos Apêndices V, VI e VII.

Os gráficos referentes ao ângulo de fase de vibração serão também apresentados.

Todos os regimes de funcionamento apresentam picos de vibração à frequência de rotação (cerca de 7Hz) demasiado elevados relativamente a todos os pontos de medida com única excepção para a chumaceira inferior da turbina que apresenta valores aceitáveis, igualmente para todos os regimes de funcionamento (verificável na Figura 41, Figura 42 e nos Apêndices V, VI e VII). Esse aumento abrupto de amplitude de vibração à frequência de rotação é caracterizador de um desequilíbrio de massas no grupo gerador tal como foi referido em capítulos anteriores.

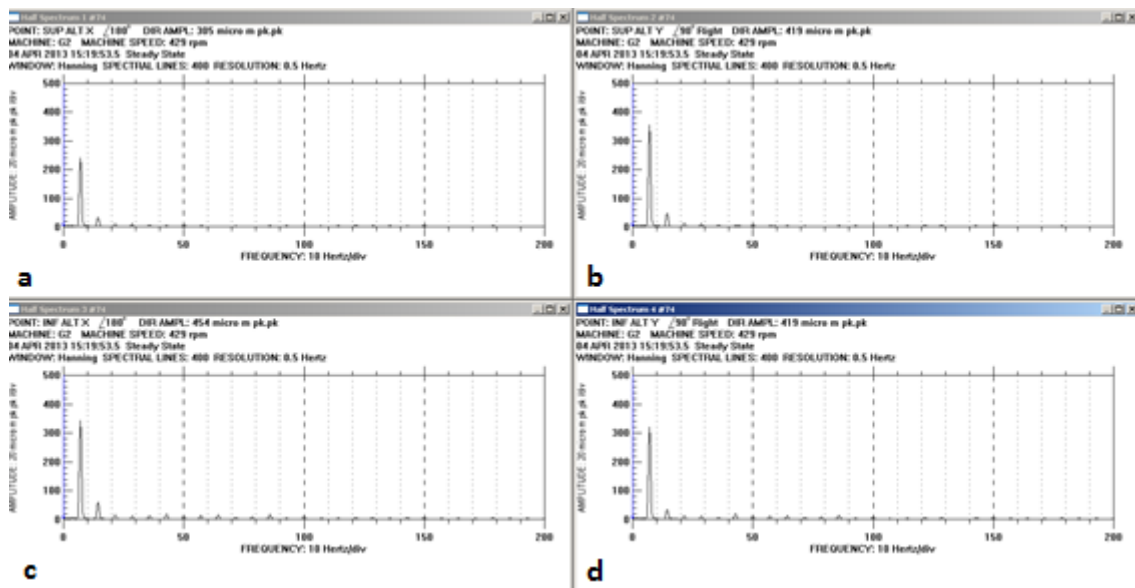


Figura 41 – Espectros de frequência em funcionamento a 20MW. a) Chumaceira superior do alternador no eixo x; b) Chumaceira superior do alternador no eixo y; c) Chumaceira inferior do alternador no eixo x; d) Chumaceira inferior do alternador no eixo y (adaptado de Peixoto, 2013).

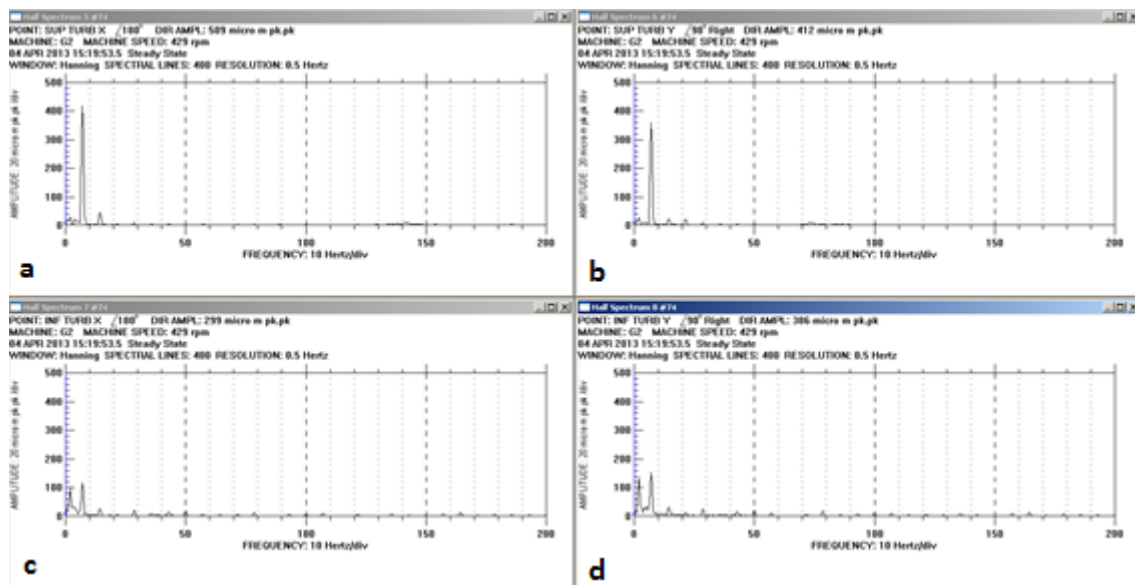


Figura 42 - Espectros de frequência em funcionamento a 20MW. a) Chumaceira superior da turbina no eixo x; b) Chumaceira superior da turbina no eixo y; c) Chumaceira inferior da turbina no eixo x; d) Chumaceira inferior da turbina no eixo y (adaptado de Peixoto, 2013).

Porém, durante o regime de funcionamento a 20MW verifica-se um outro pormenor. Apesar da amplitude de vibração à frequência de rotação ser aceitável na chumaceira inferior da turbina (c e d da Figura 42), verifica-se um outro pico de vibração antes da frequência de rotação. Visualizando atentamente o gráfico correspondente à chumaceira inferior da turbina na Figura 42 (c e d) verifica-se

que esse pico de vibração acontece a cerca de metade da frequência de rotação o que segundo os fundamentos teóricos de análise preditiva em máquinas rotativas apresentados em capítulos anteriores indicia problemas nas chumaceiras com o fenómeno denominado de *whirl oil* (picos de vibração entre 0,42 e 0,48 da frequência de rotação).

Os gráficos de ângulo de fase representam a tendência de deslocamento de vibração do veio para um determinado ângulo. Se o veio operar com desalinhamentos nos acoplamentos ou desequilibragem de massas, é provável que não se verifique essa tendência sempre para o mesmo ângulo pelo que em alguma zona de medição poderá estar em oposição de fase, isto é, em vez de operar perfeitamente na vertical opera obliquamente.

Relativamente aos gráficos de ângulo de fase de vibração (Figura 43 e Figura 44) observa-se que a vibração encontra-se em fase em todas as chumaceiras com excepção para a chumaceira inferior da turbina. A oposição de fase verificada na chumaceira referida poderá indicar problemas relativos ao acoplamento entre a roda da turbina e o veio inferior.

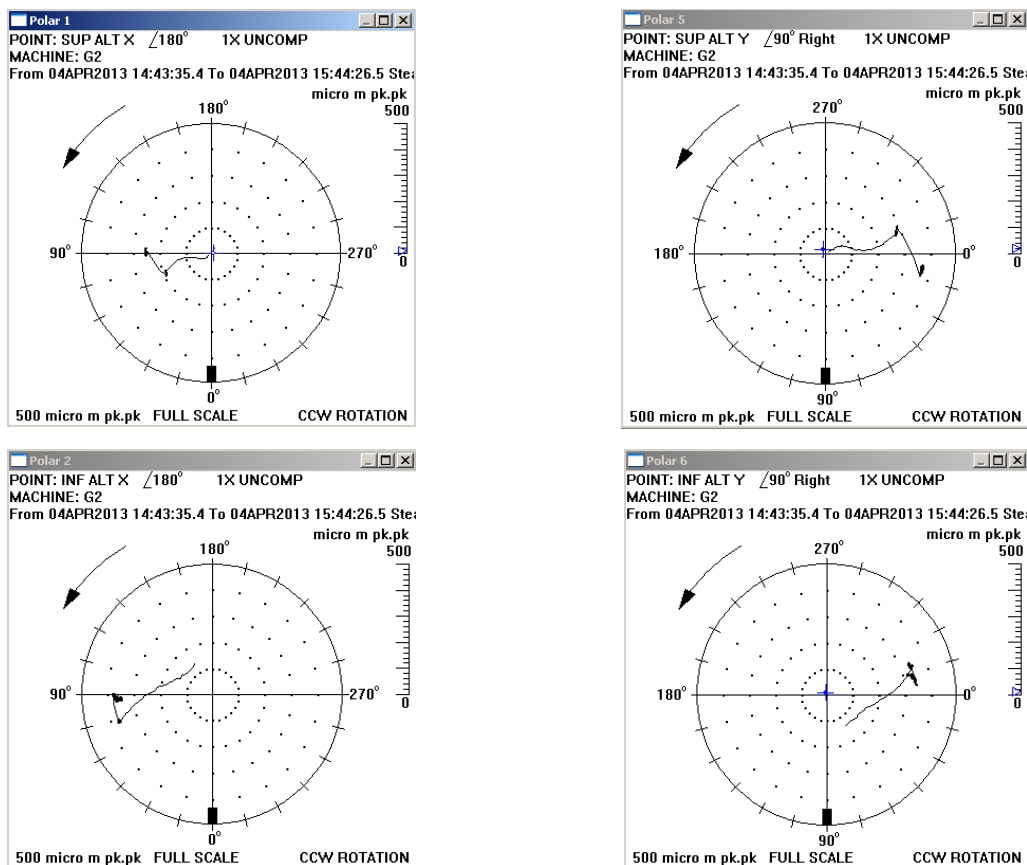


Figura 43 - Gráficos de medição de ângulo de fase de vibração (alternador). Eixo x – coluna 1; Eixo y – coluna 2 (reproduzido de Peixoto, 2013).



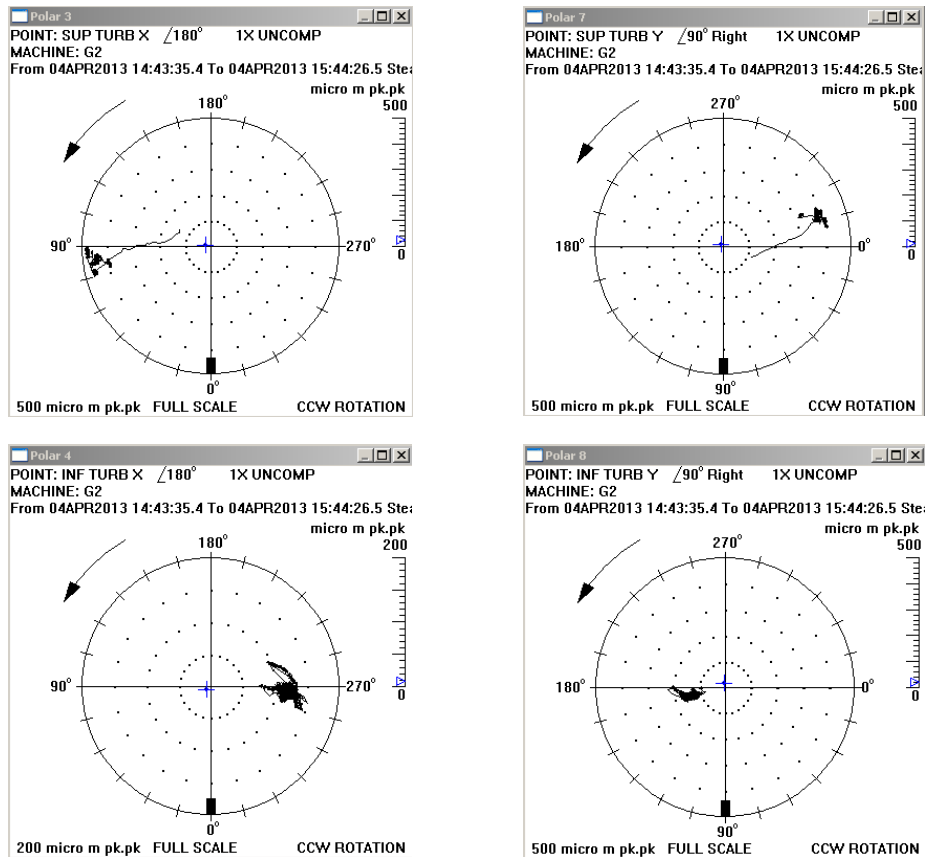


Figura 44 – Gráficos de medição de ângulo de fase de vibração (turbina). Eixo x – coluna 1; Eixo y – coluna 2 (reproduzido de Peixoto, 2013).

### 5.3.2. MODO DE FUNCIONAMENTO: BOMBA

Durante o ensaio no regime de funcionamento como bomba os pontos de medição foram um pouco diferentes. Neste ensaio foram medidos os seguintes pontos:

- Chumaceira inferior do alternador;
- Chumaceira superior da turbina;
- Chumaceira inferior da turbina;
- Chumaceira guia da bomba.

Os resultados deste ensaio continuam a premissa dos resultados obtidos no regime de funcionamento como gerador, ou seja, as amplitudes de vibração para a chumaceira inferior do alternador e superior da turbina são demasiado elevadas à frequência de rotação o que indicia novamente desequilíbrio de massas no grupo (Figura 45).

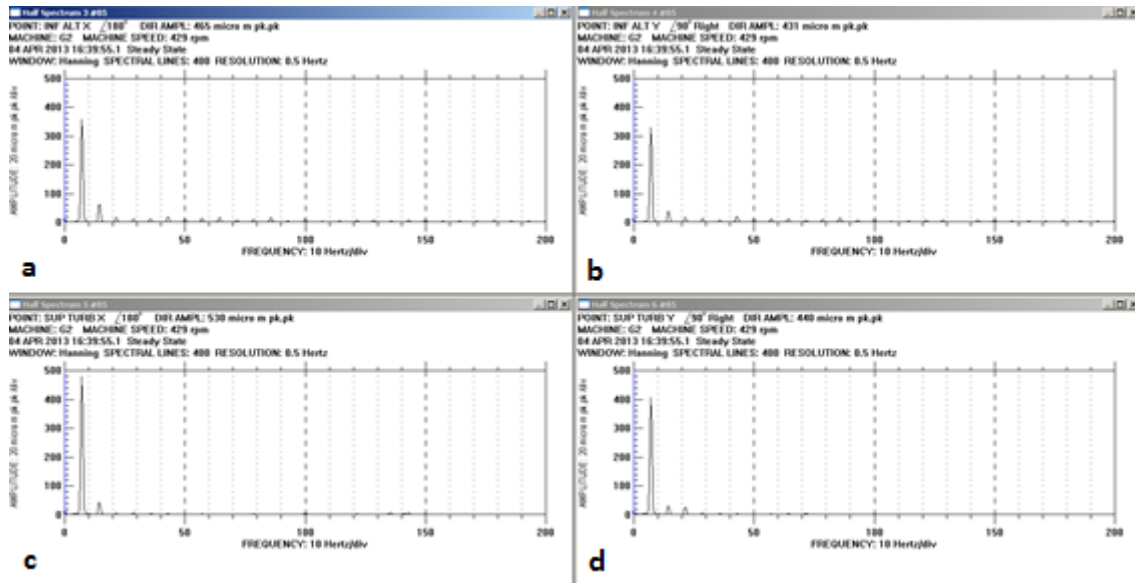


Figura 45 - Espectros de frequência em funcionamento bomba. a) Chumaceira inferior do alternador no eixo x; b) Chumaceira inferior do alternador no eixo y; c) Chumaceira superior da turbina no eixo x; d) Chumaceira superior da turbina no eixo y (adaptado de Peixoto, 2013).

Por outro lado, os valores verificados na chumaceira inferior da turbina e guia da bomba são razoáveis e aceitáveis segundo a norma ISO 7919-5 (Figura 46).

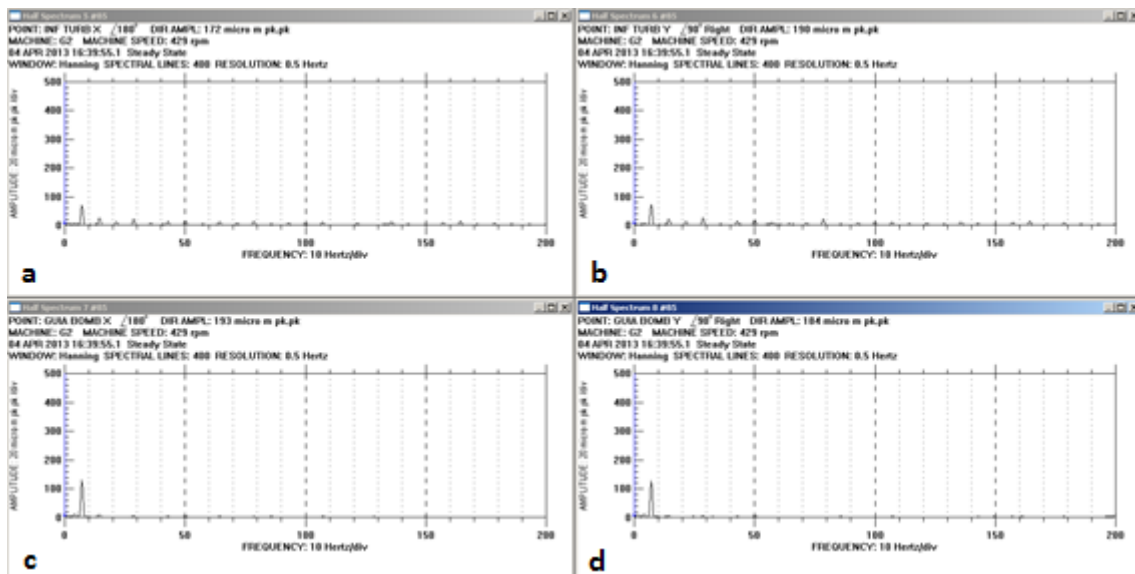


Figura 46 - Espectros de frequência em funcionamento bomba. a) Chumaceira inferior da turbina no eixo x; b) Chumaceira inferior da turbina no eixo y; c) Chumaceira guia da bomba no eixo x; d) Chumaceira guia da bomba no eixo y (adaptado de Peixoto, 2013).

No caso dos gráficos de ângulo de fase, estes apresentam a regularidade de fase em todos os pontos de medida o que poderá confirmar um problema de acoplamento entre a roda da turbina e o veio inferior (Figura 47, Figura 48 e Figura 49).

Isto poderá ser explicado pelo facto de aquando do funcionamento do grupo como bomba ser feito um acoplamento entre o veio inferior da turbina e o veio da bomba e que aumentará a rigidez do conjunto da linha de veios. Perante isto e sabendo que durante o funcionamento como bomba não existe água na zona da turbina, ou seja, não existem forças hidráulicas a actuar sobre a turbina poderão ser elementos suficientes para confirmar um desalinhamento entre o acoplamento e a roda da turbina.

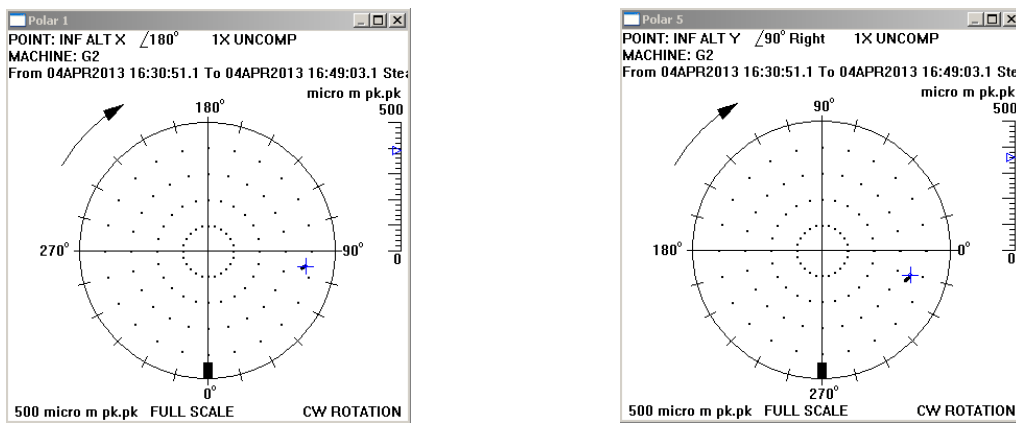


Figura 47 - Gráficos de medição de ângulo de fase de vibração, alternador (reproduzido de Peixoto, 2013).

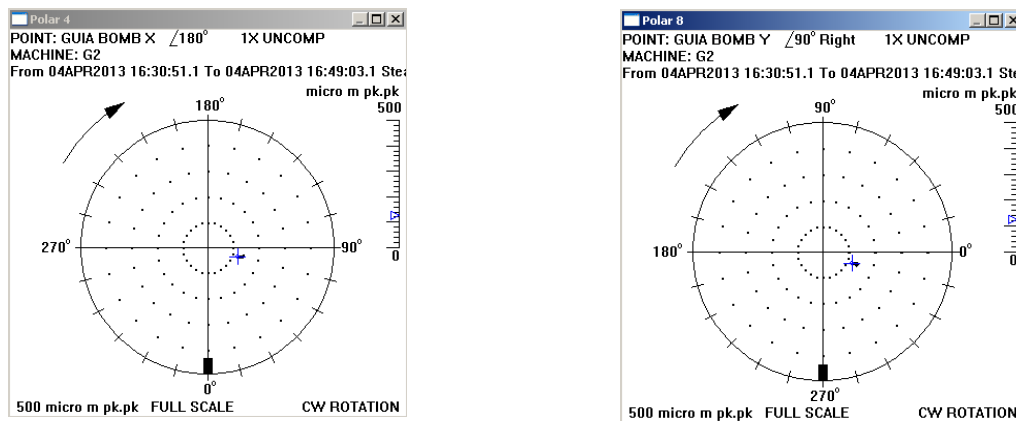


Figura 48 - Gráficos de medição de ângulo de fase de vibração, guia da bomba (reproduzido de Peixoto, 2013).

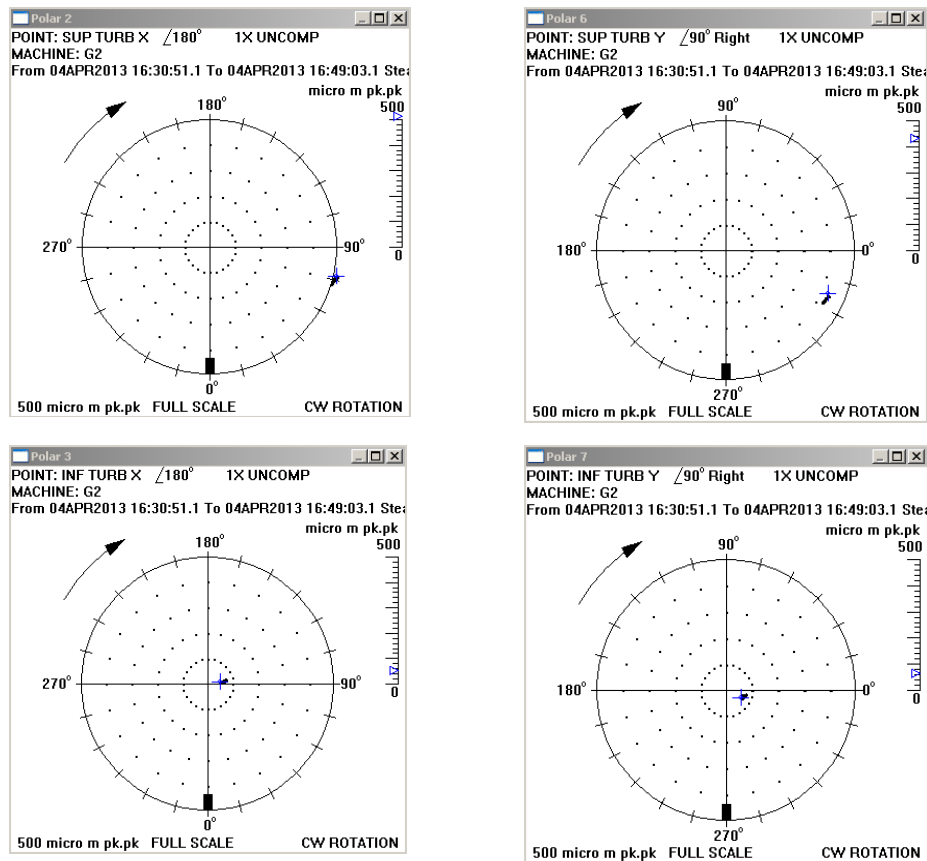


Figura 49 - Gráficos de medição de ângulo de fase de vibração, turbina (reproduzido de Peixoto, 2013)

## 6. OPTIMIZAÇÃO DA OPERACIONALIDADE DOS SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Do desenrolar do tema referente aos sistemas de monitorização e protecção de vibrações dos grupos geradores do Centro de Produção Cávado-Lima surgiu a proposta de iniciativa Lean: Optimização da operacionalidade dos sistemas de monitorização de vibrações.

Esta proposta reflecte o estado dos sistemas de monitorização de vibrações aquando do levantamento da situação de cada equipamento. Foi verificada a necessidade de otimizar os recursos existentes neste âmbito, sobretudo devido às potencialidades que são oferecidas e à facilidade e escassez de recursos exigidos a essa optimização. No Apêndice IX, encontra-se o documento proposta da iniciativa, “Optimização da operacionalidade dos sistemas de monitorização de vibrações (SMV)”.

O propósito será encontrar o conjunto de actividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros, que serão capazes de indicar a performance ou desempenho do grupo gerador, de modo sistemático, possibilitando visualizar a necessidade quanto à realização de intervenções.

No entanto, o estado actual dos SMV não se encontra em perfeitas condições de funcionamento. É reconhecida a deficiência dos computadores dedicados à recolha de dados vibrações

em alguns aproveitamentos hidroelétricos inseridos no centro de Produção Cávado-Lima. Computadores avariados e/ou desligados, sistemas operativos obsoletos e, adicionalmente a isto, acresce a inexistência da análise sistemática de informação fornecida pelos sistemas de monitorização e protecção de vibração que poderá ser fundamental num cenário de antecipação à falha. No entanto, salienta-se que a protecção dos grupos geradores relativamente a excesso de vibração actua independentemente do funcionamento do computador dedicado. Estas são razões suficientes a uma intervenção de melhoria e optimização do sistema de monitorização e protecção de vibrações. Além disso, a optimização destes equipamentos direccionada à recolha e utilização de dados para a implementação de um tipo de manutenção preditiva acarreta vantagens de eficiência dos grupos geradores, sobretudo no que concerne ao alargamento de vida útil dos equipamentos.

A implementação desta iniciativa Lean está intrinsecamente ligada à manutenção dos grupos geradores. Das vantagens directas previstas destacam-se, por exemplo:

- Planeamento de intervenções mais exaustivo e conseqüente aumento de disponibilidade do grupo gerador;
- Redução da substituição precoce de órgãos/equipamentos;
- Redução do número de “open, inspect and repair, if necessary”. [Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance]

O esquema na Figura 50 representa o ciclo objectivo de funcionamento para os SMV.



Figura 50 – Ciclo objectivo da iniciativa

Esta iniciativa, relacionada com o referido anteriormente em toda a dissertação e em especial à proposta de melhoria propostas nos SMV, integrará todas as centrais com equipamentos VM600, que totalizam-se em 6.

São destacados 5 pontos-chave para o correcto desenvolvimento desta iniciativa que serão individualizados para uma descrição completa das tarefas a desenvolver:

- Operacionalidade dos SMV;
- Manutenção sistemática;
- Parametrização;
- Formação;
- Acesso remoto aos SMV.

### 6.1. Operacionalidade dos sistemas de monitorização de vibrações

Esta tarefa envolve resolver os problemas que foram verificados aquando da campanha de verificação de funcionamento dos SMV. Foram encontrados vários problemas de funcionamento. As tarefas a realizar para que a operacionalidade dos SMV seja real e por forma a uniformizar todos os SMV do Centro de Produção Cávado-Lima são:

- Substituição dos computadores dedicados aos SMV que se encontram obsoletos e/ou avariados. Todos os computadores devem ficar com o sistema operativo Windows XP (licenças disponíveis no CPCL);
- Os IP's dos equipamentos VM600 e dos computadores dedicados deverão ser uniformizados devendo apenas mudar os dois últimos algarismos. Por exemplo: 100.100.100.001 (rack) e 100.100.100.011 (computador) para um aproveitamento e 100.100.100.002 (rack) e 100.100.100.022 (computador) para um outro aproveitamento e assim sucessivamente;
- A alimentação dos computadores dedicados deve ser “pendurada” na mesma alimentação dos equipamentos VM600 (alimentação sem falha);
- Sensores avariados deverão ser substituídos (trabalho realizável pelos técnicos da empresa);
- Cartas avariadas devem ser substituídas (adjudicação de tarefa a empresa qualificada, por exemplo TecVib);
- Elaboração de manual de documentação (Apêndice X)

### 6.2. Manutenção sistemática

A implementação de manutenção sistemática ditará o contínuo bom funcionamento dos SMV. Assim propõe-se (Apêndice XI):

- Sistemática semanal com as seguintes tarefas: verificação de funcionamento do equipamento VM600, verificação de funcionamento do computador associado;
- Sistemática mensal com as seguintes tarefas: verificação de funcionamento do software MPS-2 (em gravação), verificação de coloração dos gráficos de barras, manutenção de limpeza do armário dos SMV;
- Sistemática semestral com a seguinte tarefa: recolha de dados históricos dos SMV;
- Elaboração de manual de procedimentos para sistemática semanal (Apêndice XII).

### **6.3. Parametrização**

A parametrização actual não se coaduna com o normal funcionamento das máquinas visto que constantemente surgem alarmes e disparos (apenas sinalização). Isto provém da falta de uma abordagem profunda ao funcionamento de cada máquina antes de associar uma parametrização. Para uma correcta reparametrização sugere-se:

- Levantamento de parametrização actual e estudo da mesma;
- Recolha de histórico de cada máquina para estipular nova parametrização segundo as normas ISO 7919-5 e ISO 10816-5 (pelo menos um ano de histórico válido);
- Na ausência de histórico, proceder à reparametrização após um ano de recolha;
- Verificação de funcionamento de relés de alarmes e disparos.

### **6.4. Formação**

A formação dos técnicos tem como finalidade não só a informação acerca de como devem proceder às manutenções sistemáticas mas também sensibilizar perante as vantagens que o bom funcionamento dos SMV acarreta. A formação deverá contemplar a apresentação do manual de documentação, do manual de procedimentos e uma informação global sobre o equipamento VM600 e a vibração de grupos geradores hídricos.

### **6.5. Acesso remoto aos SMV**

O acesso remoto aos SMV seria sem dúvida uma mais-valia para situações de vigilância a determinado grupo gerador. Este tipo de situação permitiria a verificação do fenómeno de vibração da

máquina à distância de um *click* o que é altamente positivo visto que os vários aproveitamentos distam uns de outros. Considera-se que este assunto deverá ser estudado e discutido perante os protocolos e autorizações necessárias para uma avaliação de viabilidade.



## PARTE V – CONCLUSÕES



## 1. CONCLUSÕES

A manutenção preditiva é uma técnica com muito interesse para utilização em centrais hidroelétricas como provam os benefícios apresentados por várias empresas e trabalhos publicados por diversos investigadores. A análise de vibração é a técnica mais aplicada nos grupos geradores hidricos pelo facto de serem máquinas rotativas, de ciclos bem definidos. A sua “assinatura”, obtida através dos espectros de frequência caracterizam com eficácia as falhas conseguindo-se com antecipação informação sobre a necessidade de intervenção, assegurando a implementação de uma filosofia de manutenção preditiva eficiente.

O estudo feito ao caso concreto dos sistemas de monitorização e protecção de vibrações das centrais do centro de Produção Cávado-Lima verifica-se que alguns sistemas de manutenção preditiva estavam instalados, mas com aproveitamento em parte deficiente relativamente ao seu estado de funcionamento. Foi verificada a inoperacionalidade de vários sistemas relativamente ao sistema de recolha de dados, a falta de organização de documentação e a falta de manutenção aos equipamentos. A principal razão destas ocorrências tem a ver com as soluções instaladas serem pouco práticas e exigirem muita intervenção humana, na colheita de resultados, sem o correspondente retorno com ocorrências suficientes que justifiquem o esforço exigido.

Consequência da conclusão referida anteriormente, foram propostas melhorias imediatas aos sistemas de monitorização de vibrações, apresentadas na dissertação, o que resultou numa iniciativa, que foi posta em prática pela empresa, para otimizar a operacionalidade dos sistemas de monitorização e protecção de vibrações.

Em particular foi feito um estudo mais exaustivo ao equipamento de análise de vibrações VM600 da central de Caniçada verificando-se que é apropriado para protecção do grupo gerador mas não suficiente para a monitorização de condição e consequente implementação de manutenção preditiva. Conclui-se que é possível beneficiar o equipamento existente com a adição de novos módulos específicos para a monitorização de condição e assim se conseguir um sistema que simultaneamente proteja e permita a implementação da manutenção preditiva.

Os ensaios de vibração realizados na central do Alto Rabagão apresentaram resultados compatíveis com os esperados pelos responsáveis da manutenção mecânica do Centro de Produção Cávado-Lima. Estes ensaios foram realizados por se prever um desequilíbrio de massas no grupo gerador e/ou um desalinhamento da linha de veios com base no conhecimento prático do histórico desta máquina. A apresentação dos resultados e discussão dos mesmos corroboram assim os valores exigidos pela normalização aplicada mas a análise dos espectros de frequência indicam alguns

desequilíbrios de massas e desalinhamentos da linha de veios, que a empresa vai procurar corrigir na próxima intervenção.

Com esta análise, conclui-se que a implementação de manutenção preditiva nas centrais hidroelétricas mesmo partindo dos equipamentos já existentes é uma mais-valia pelo facto de antecipadamente prever-se as falhas do grupo gerador. Esta análise de condição aplicada permanentemente permitirá ao departamento de manutenção mecânica identificar, planear e executar operações de manutenção num espaço temporal controlado resultando assim em benefícios financeiros previsíveis pelo controlo pormenorizado das intervenções salvaguardando indisponibilidades.

## 2. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

O trabalho realizado requer continuidade para que as falhas encontradas sejam colmatadas.

Assim sugere-se:

- Implementação efectiva de manutenção sistemática aos sistemas de monitorização de vibrações;
- Estudo de histórico de dados e delineamento de nova parametrização dos sistemas de monitorização de vibrações;
- Estudo de implementação de controlo remoto nos sistemas de monitorização de vibrações;
- Formação aos técnicos da empresa orientada para a manutenção sistemática proposta.

Além disso, verificou-se a potencialidade do estudo de implementação no Centro de Produção Cávado-Lima pelo facto de uma das centrais – Central de Vilarinho das Furnas - estar equipada com um sistema de monitorização de condição VM600 CMS (ainda que inoperacional). Com isto, sugere-se que este sistema colocado em operação e estudado exaustivamente sirva como projecto-piloto de implementação de uma filosofia de manutenção preditiva.

## BIBLIOGRAFIA

Adams, Maurice. (2010). *Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting*. Taylor & Francis Group, LCC. ISBN 978-1-4398-0717-0.

Almeida, Fabrício. (2008). *Diagnóstico automático de falhas em grupos geradores hidroelétricos utilizando técnicas preditivas de manutenção e redes neurais artificiais*. Tese de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, Brasil.

Brown, Michael V. (2003). *Applying the Predictive Approach*. New Standard Institute, Inc. Disponível em URL:

[http://www.plantservices.com/knowledge\\_centers/nsi/assets/Applying\\_the\\_Predictive\\_Approach.pdf](http://www.plantservices.com/knowledge_centers/nsi/assets/Applying_the_Predictive_Approach.pdf)

Declaração Ambiental 2011, Direção de Produção Hidráulica, Centro de Produção Cávado-Lima.

Dunca, Georgiana. (2012). *Vibrations level analysis during the operation of high head hydropower plant*. ISSN 1454-2358. Disponível em URL:

[http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full8fd\\_790717.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full8fd_790717.pdf)

Ezeasor, Ikenna. (2010). *Review of condition monitoring of cavitation phenomenon in hydropower plants*. Master Thesis, Lulea University Technology, Lulea, Suécia. Disponível em URL:

<http://epubl.ltu.se/1402-1617/2010/118/LTU-EX-10118-SE.pdf>

General Electric Company. (2011). *Conditions monitoring solutions for hydro, Bently Nevada\* Asset Condition Monitoring*. 2011. Disponível em URL: [http://www.ge-mcs.com/download/monitoring/GEA\\_13978C\\_L.pdf](http://www.ge-mcs.com/download/monitoring/GEA_13978C_L.pdf)

ISO 10816-5, 2000. *Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants*.

International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 1925:2001, 2001. *Mechanical vibration – Balancing – Vocabulary*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 2041:1990 – *Vibration and shock vocabulary*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 7919-5, 2005. *Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Manual da Organização, EDP Gestão da Produção de Energia, 2008.

Maynard, Ken. (2001). *Application of torsional vibration measurement to shaft crack monitoring in power plants*. The Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA. Disponível em URL: [www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADP013495](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADP013495)

Meireles, José. (2012). *Apontamentos da UC Dinâmica de Estruturas*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Mecânica, Guimarães, Portugal.

Mobley, R. Keith. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier Science. ISBN 0-7506-7531-4.

NASA. (2008) *RCM GUIDE, RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE GUIDE, For Facilities and Collateral Equipment*. 2008. Disponível em URL: <http://www.hq.nasa.gov/office/codej/codejx/Assets/Docs/NASARCMGuide.pdf>

EDP. [n.d.]. *Norma 16 - Codificação base de equipamentos e elementos de obra do parque da PRPH*.

NP EN 13306:2007 – *Terminologia da manutenção*.

Peixoto, Ernesto. (2012). Presentation. *Vibration Monitoring Systems (VMS) are not just a tool of maintenance*. EDP-Hydro Division. Bilbao. Spain.

Peixoto, Ernesto.(2013). Relatório de ensaios. *Medição de Vibrações do Grupo 2*. Central do Alto Rabagão. EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A.

Rodrigues, José Dias. (2012). *Apontamentos de Vibrações de Sistemas Mecânicos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Departamento de Engenharia Mecânica. Porto. Portugal.

Scheffer, C; Girdhar, Paresh. (2004). *Practical Machinery Vibrations Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier. ISBN 0-7506-6275-1.

Telang, A. D.; Telang, Amit. (2010). *Comprehensive Maintenance Management: Policies, Strategies and Options*. PHI Learning. ISBN-10: 8120339533.

Tenzin, T. (2010) *A hybrid on-line vibration monitoring systems and finite element simulation of vertical hydro turbine generators*. CMVA 2010 Conference. Canada.

Tenzin, T. (2012). *Benefits of on-line monitoring systems in detecting hydro turbine generator's dynamic behavior*. Asia International Conference. Chiangmai, Thailand. March 2012.

VM600 Series. [n.d.]. *State of the Art Machinery Monitoring Solutions*. Disponível em URL: [http://www.aesse-misure.it/nCmsData/ia/6084\\_VM600\\_CMS\\_W\\_description.pdf](http://www.aesse-misure.it/nCmsData/ia/6084_VM600_CMS_W_description.pdf)

Wiedenbrug, E. (2013). *Instantaneous torque as predictive maintenance*. SKF Condition Monitoring Center – Fort Collins. Disponível em URL: <http://www.skf.com/binary/tcm:12-128048/Instantaneous%20Torque%20as%20Predictive%20Maintenance%20Tool.pdf>





## APÊNDICES



## APÊNDICE I

(Caracterização dos equipamentos do sistema de monitorização de vibrações da central de Caniçada)

### Rack

O sistema VM600 instalado aloja-se no chassis de modelo ABE040, conhecida por rack de 19.



A rack de 19 é uma caixa em alumínio de construção Vibro-meter para alojar hardware do sistema VM600. É um conceito modular para adicionar as cartas específicas a cada sistema em particular. Cada rack tem capacidade de alojar até 15 cartas simples.

### RPS6U

A carta de alimentação RPS6U é desenhada para alimentar electricamente o sistema VM600. A rack, e por conseguinte o sistema, pode ser alimentado por uma única carta de alimentação. Opcionalmente poderão ser instalada duas cartas de alimentação na mesma rack, é o caso do sistema instalada na central da Caniçada, para proporcionar redundância entre elas, aumentando assim disponibilidade da rack.



## MPC 4

A carta de protecção da máquina MPC 4 é o elemento central do sistema. Esta versátil carta tem a capacidade de medir e monitorizar até 4 sinais de entrada dinâmicos e 2 sinais de entrada de velocidade simultaneamente. Os sinais de entrada dinâmicos são completamente programáveis aceitando sinais representando deslocamento, velocidade ou aceleração. Permite medir vários parâmetros físicos em que se destaca, neste caso, a vibração relativa e absoluta e o deslocamento máximo (Smáx).

A carta é responsável pelo processamento digital incluindo filtros, integração, rectificação, etc. Os alarmes e disparos estão também integrados nesta carta de processamento com a sua parametrização. Cada carta MPC 4 tem um conjunto de LED's que indicam o estado e os alarmes relativos a cada sensor ligado à carta. A cada carta MPC 4 está associada uma carta de entrada/saída de sinal IOC4T. Neste caso específico, do sistema de monitorização e protecção de vibração da central da Caniçada, existem 6 cartas de protecção da máquina MPC 4 (3 referentes a cada grupo gerador) racionalizada pelo número de sensores de proximidade e acelerómetros instalados.



## IOC N

IOC N é uma carta desenhada para o sistema VM600 e para exclusiva função de comunicação a uma rede. Está equipada com vários e diferentes tipos de saídas, duas RJ25 e cinco RJ11.



## IOC4T

A carta de entrada/saída de sinais é uma interface da carta MPC 4. Esta carta, instalada na parte traseira da rack e imediatamente atrás da associada MPC 4, recebe os sinais oriundos dos sensores, através da cablagem, e transmite-os à carta de protecção MPC 4. A carta IOC4T protege todos os sinais de entrada e saída de interferências electromagnéticas.

As ordens de alarme e disparos da carta de protecção MPC 4 são transmitidas em sinais de saída à carta IOC4T que por sua vez está equipada com 4 relés locais para actuação nestes casos.



## CPU M

Esta carta é a unidade central de processamento. Esta carta pode ser usada sozinha ou conjuntamente à carta de entrada/saída IOC N. A carta CPU M é a responsável por toda a interface de configuração, display e comunicação do sistema VM600.

A carta CPU M proporciona uma ligação Ethernet.



## SE 120

Existem 4 acelerómetros em cada grupo gerador, três dos quais instalados no plano radial e um outro no plano axial. Estes acelerómetros, de fabrico Vibro-Meter, estão instalados para medição de vibração absoluta axial e radial. Encontram-se instalados na chumaceira de impulso, chumaceira superior do alternador, chumaceira inferior do alternador e chumaceira da turbina. Este sistema integra a informação dos acelerómetros para que esta seja exposta, em display, nas unidades de velocidade (mm/s e RMS) conforme especificado nas condições técnicas exigidas pela EDP, S.A.

O modelo instalado, SE 120, é adequado para máquinas rotativas de baixa velocidade e turbinas hidráulicas. Este acelerómetro piezoelétrico apresenta alta sensibilidade. Destacam-se as seguintes características:

	Peso	Sensibilidade	Temperaturas de funcionamento	Frequência
SE 120	3,2g	2 mA/g	0 a 75 °C	0,2 a 750 Hz



### TQ 402

Os sensores de proximidade, tipo Eddy-Current, estão dispostos no grupo gerador para medirem as vibrações relativas. Estão localizados na chumaceira superior do alternador, chumaceira inferior do alternador e chumaceira da turbina. Em cada local (chumaceiras existem 2 sensores de proximidade, dispostos a 90<sup>0</sup>, para as leituras de vibração relativa ( $\mu\text{m}$ , pk-pk) de cada um dos eixos (xx e yy). Existe também um sensor TQ 402, por grupo, responsável pela medição de velocidade de rotação.

	Alcance	Sensibilidade	Temperaturas de funcionamento	Ø tip
TQ 402	4mm	4mV/ $\mu\text{m}$	-40 a 180 °C	8mm



### IQS 450

Os sensores de proximidade descritos anteriormente têm associados, a cada um, um condicionador de sinal IQS 450. O condicionador de sinal contém um modulador/demodulador de alta frequência que alimenta a condução do sinal até ao sensor de proximidade TQ 402. Com isto, gera o campo electromagnético necessário usado para a medição do gap.



### **ABA 151**

Os condicionadores de sinal são alojados em caixas de alojamento ABA 151. Estas caixas de alojamento são concebidas para proteger os condicionadores de sinal do ambiente agressivo e tem capacidade até 3 condicionadores de sinal.



### **JB 116**

Estas caixas de junção são instaladas para fazerem e protegerem a ligação do cabo integral do acelerómetro ao cabo de transmissão de sinal que dará entrada na rack.





## RLC16

Esta carta de relés foi desenhada para os sistemas VM600. Esta carta opcional é usada quando os 4 relés existentes nas cartas de entrada/saída IOC4T não são suficientes. Cada carta tem 16 relés disponíveis em que cada um tem 3 terminais disponíveis.



## Computador

Os sistemas VM600 são equipados com um computador dedicado para display, configuração e armazenamento de dados do sistema.

O sistema instalado na central da Caniçada é um exemplo da aplicação deste sistema utilizando um computador dedicado ao sistema. O computador, com uma memória de 480MB e de sistema operativo Windows 98, opera com o software do sistema de monitorização e protecção de vibrações MPS. Este computador tem uma UPS (uninterruptible power supply).



## Software

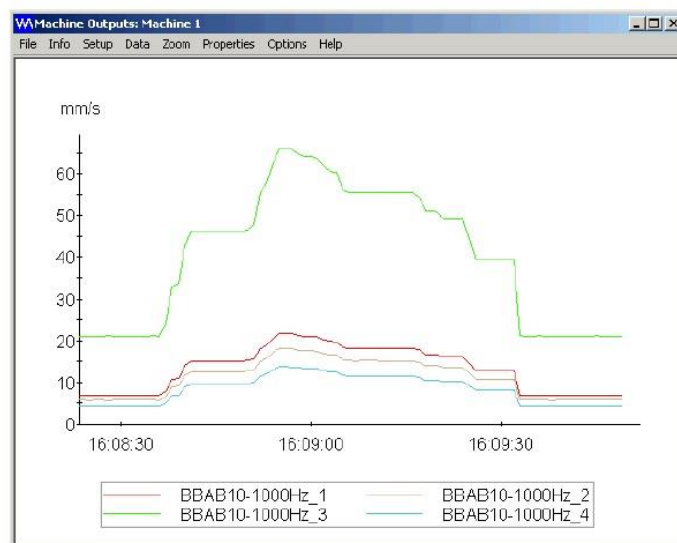
O software MPS (machinery protection systems) é o responsável pela configuração do sistema. Neste caso, a configuração dos canais das cartas MPC 4 com os parâmetros de velocidade e vibração respectivos. Inclui as características dos sensores, a escolha do tipo de vibração, a definição das unidades de medida, nível de alarmes e disparos, etc.

O software MPS está dividido em dois pacotes, MPS 1 e MPS 2. Ambos têm a mesma configuração funcional sendo que o MPS 2 tem o acréscimo de capacidade de armazenamento de dados e display de características.

O software instalado, está desenhado de acordo com as condições técnicas impostas em que se destaca as seguintes particularidades:

- Leitura por canal em diversas unidades e tipos de processamento;
- Display de tendência com alarmes indicadores;
- Display no formato gráfico de barras, gráfico de linhas;
- Alarmes e respectivos “status”;
- Lista de acontecimentos;
- 4 Níveis de password.

As figuras abaixo são representativas do ambiente de trabalho do software MPS.





## APÊNDICE II

(Caracterização dos equipamentos complementares: CMC16, IOC16T e programa CMS)

### CMC 16

A carta CMC 16, em conjunto com o software CMS, é usada para adquirir, analisa e transmitir resultados para o computador dedicado ao sistema.

Os sinais de entrada são completamente programáveis, aceitando sinais representando velocidade, referência de fase, vibração (aceleração, velocidade ou deslocamento), pressão, etc. Os sinais podem dar entrada através da carta adjacente MPC 4, descrita anteriormente.

A carta CMC 16 tem a carta IOC 16T associada (similar à carta MPC 4 e IOC 4T). Esta carta é responsável pelo controlo de aquisição, conversão de domínio no tempo para domínio na frequência (FFT), extracção de banda, etc.

Os sinais de saída poderão ser visualizados em várias unidades, com 10 possibilidades por canal. Podem ser: RMS, peak, peak-peak, true peak, Smax, etc.



### IOC 16T

Esta é a carta de entradas/saídas de sinais fazendo o interface com a carta CMC 16 nos sistemas VM600 CMS.

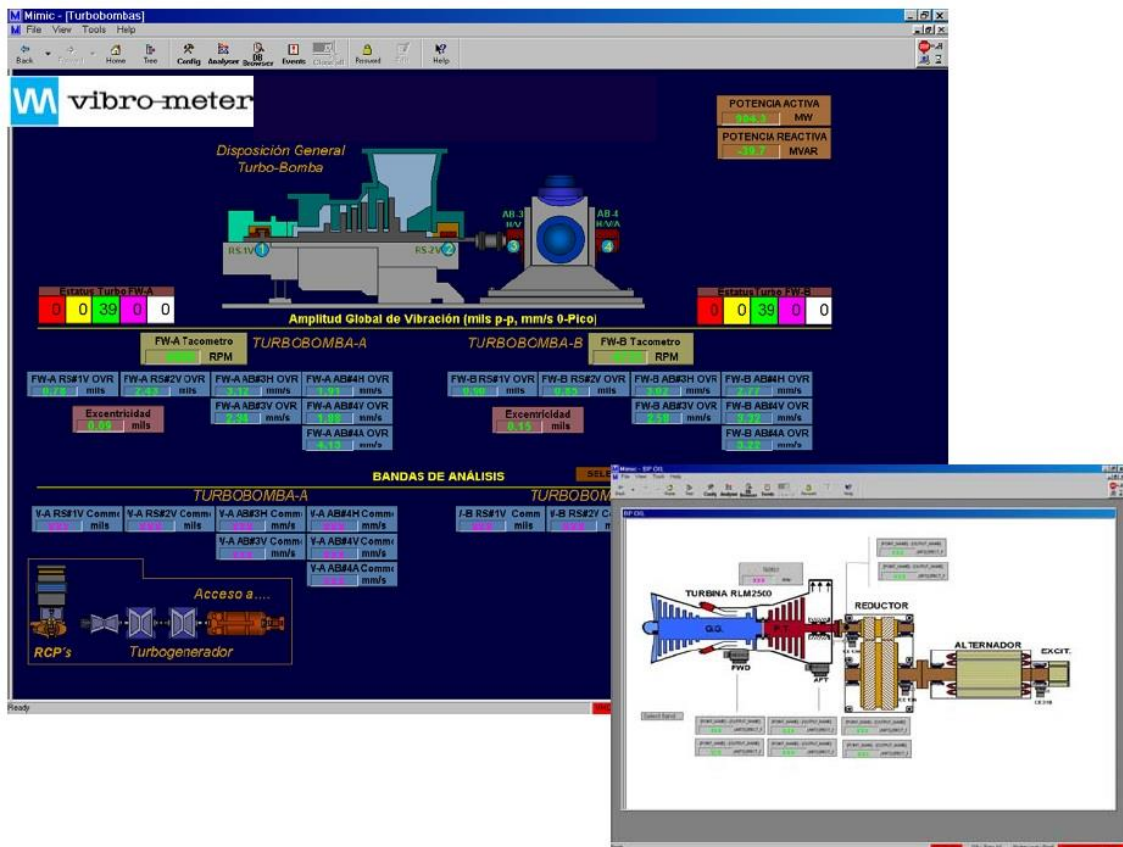


### Software

O software CMS é baseado no princípio da manutenção preditiva, da análise de condição, e é dedicado para apoiar técnicos, operador e engenheiros para uma identificação precoce de problemas, avaliação dos mesmos e por fim determinar a acção mais assertiva.

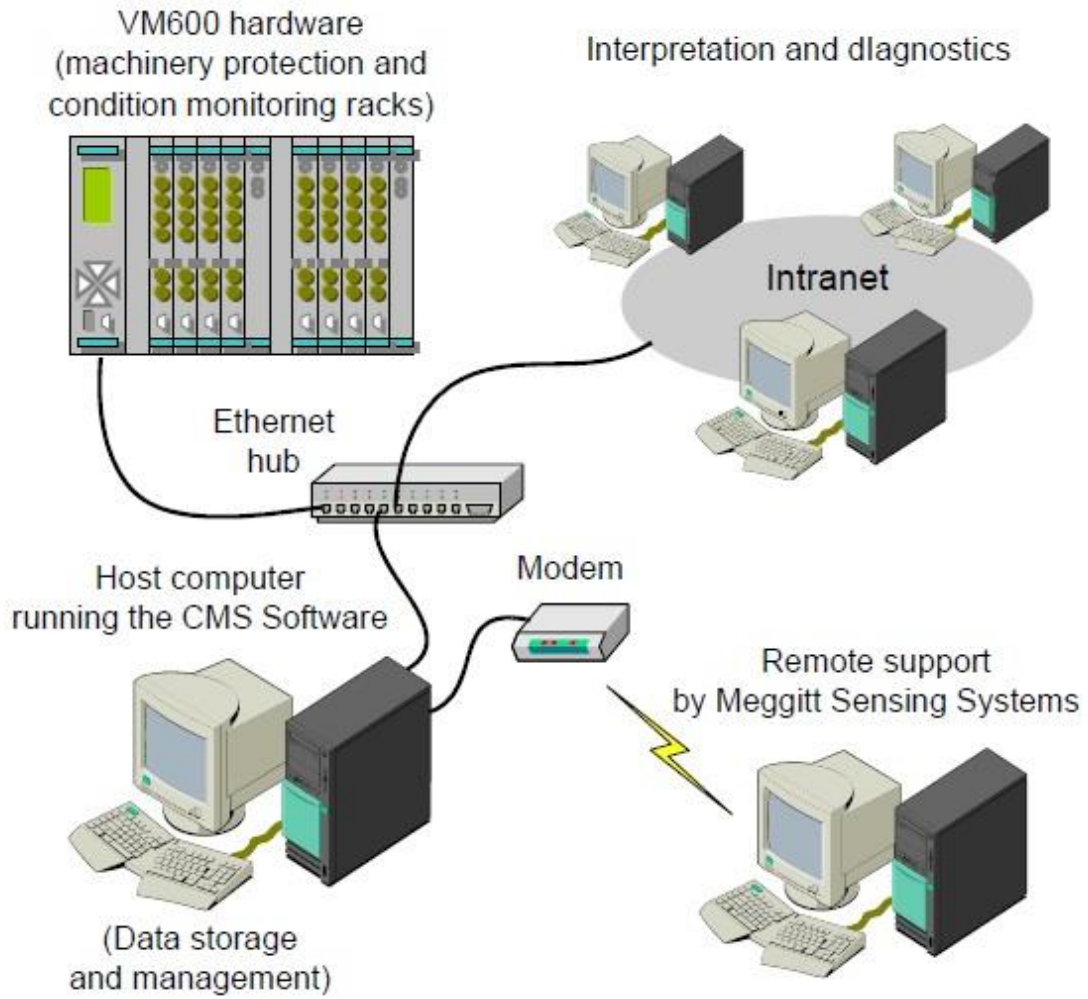
Este software tem uma arquitectura modular que se adapta às necessidades de cada equipamento. Na sua utilização, configura-se os parâmetros que se pretende analisar antes da aquisição e processamento de sinal para que depois os resultados possam ser disponibilizados de forma a assistir a uma análise avançada e conseguinte diagnóstico da máquina monitorizada.

Este software tem várias capacidades de análise no que concerne à análise no domínio de frequência e análise baseada na condição fornecendo vários tipos de gráficos usados nestas avaliações. Além de fornecer os espectros de frequência imprescindíveis à manutenção preditiva com base na análise de vibrações está também capacitado para fornecer: diagramas em tempo real "MIMIC", órbitas, espectros, centralização do veio, etc.



O CMS tem a capacidade de análise em regime transiente diferente do regime em estado estacionário. Permite também fazer comparações com uma base pré-definida dos espectros de vibração, órbitas, arranques e paragens o que se torna realmente vantajoso para a identificação precoce de anomalias. Além disso é possível, graças a um módulo opcional do software chamado de Diagnostic Rule Box, configurar condições criando alarmes e alertas e que, por último, poderá gerar acções automáticas que adequadamente avisa o utilizador de eventos ocorridos.

Uma outra vantagem da utilização deste software é a sua ligação a uma rede. O software pode ser acedido directamente do computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações e que é onde o software está instalado e por outros computadores conectados a uma rede intranet o que facilita sobretudo quando os equipamentos se encontram deslocados dos responsáveis pela interpretação da análise. Pode ser também utilizada uma ligação remota via internet.





## APÊNDICE III

(Parametrização de alarmes e disparos do sistema de monitorização e protecção de vibrações da central de Caniçada)

Grupo	Localização	Medida	Alarme	Disparo	Unidade	Temporização (s)
1	Ch. Impulso	Vib. abs. axial	2,5	3,0	mm/s rms	60
1	Ch. Sup. Alt	Vib. abs. radial	1,0	1,5	mm/s rms	60
1	Ch. Sup. Alt (Smáx)	Vib. Rel.	250	275	µm pk-pk	60
1	Ch. Inf. Alt (Smáx)	Vib. Rel.	150	200	µm pk-pk	90
1	Ch. Inf. Alt	Vib. Abs. radial	1,5	2,0	mm/s rms	90
1	Ch. Turbina (Smáx)	Vib. Rel.	150	200	µm pk-pk	90
1	Ch. Turbina	Vib. Abs. radial	1,5	2,0	mm/s rms	90
2	Ch. Impulso	Vib. abs. axial	2,5	3,0	mm/s rms	90
2	Ch. Sup. Alt	Vib. abs. radial	1,5	2,0	mm/s rms	90
2	Ch. Sup. Alt (Smáx)	Vib. Rel.	200	250	µm pk-pk	90
2	Ch. Inf. Alt (Smáx)	Vib. Rel.	275	300	µm pk-pk	90
2	Ch. Inf. Alt	Vib. Abs. radial	2,5	3,0	mm/s rms	90
2	Ch. Turbina (Smáx)	Vib. Rel.	230	250	µm pk-pk	90
2	Ch. Turbina	Vib. Abs. radial	1,0	1,5	mm/s rms	90



## APÊNDICE IV

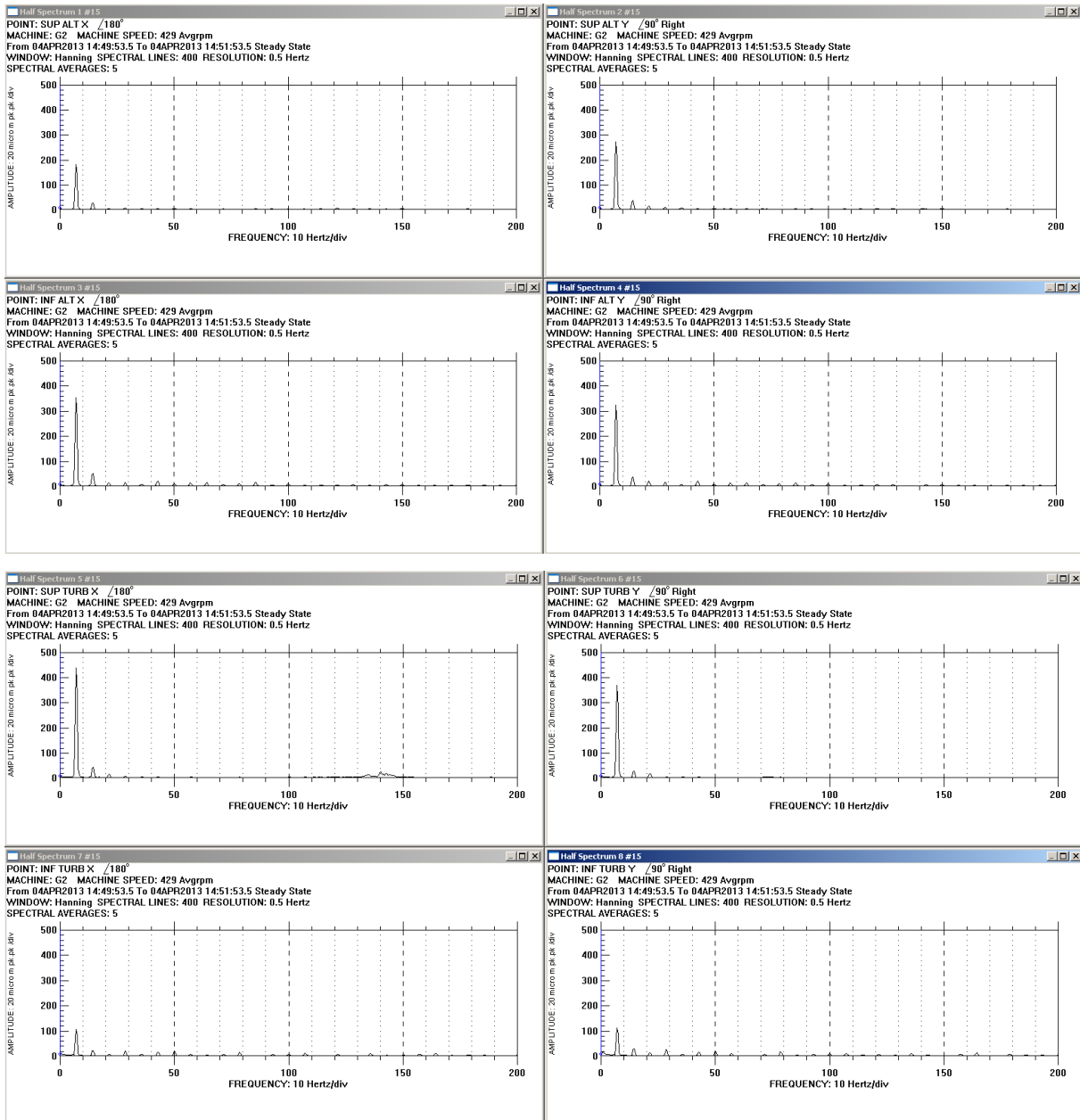
(Fotografias elucidativas do sistema de monitorização e protecção de vibrações da central de Caniçada)





## APÊNDICE V

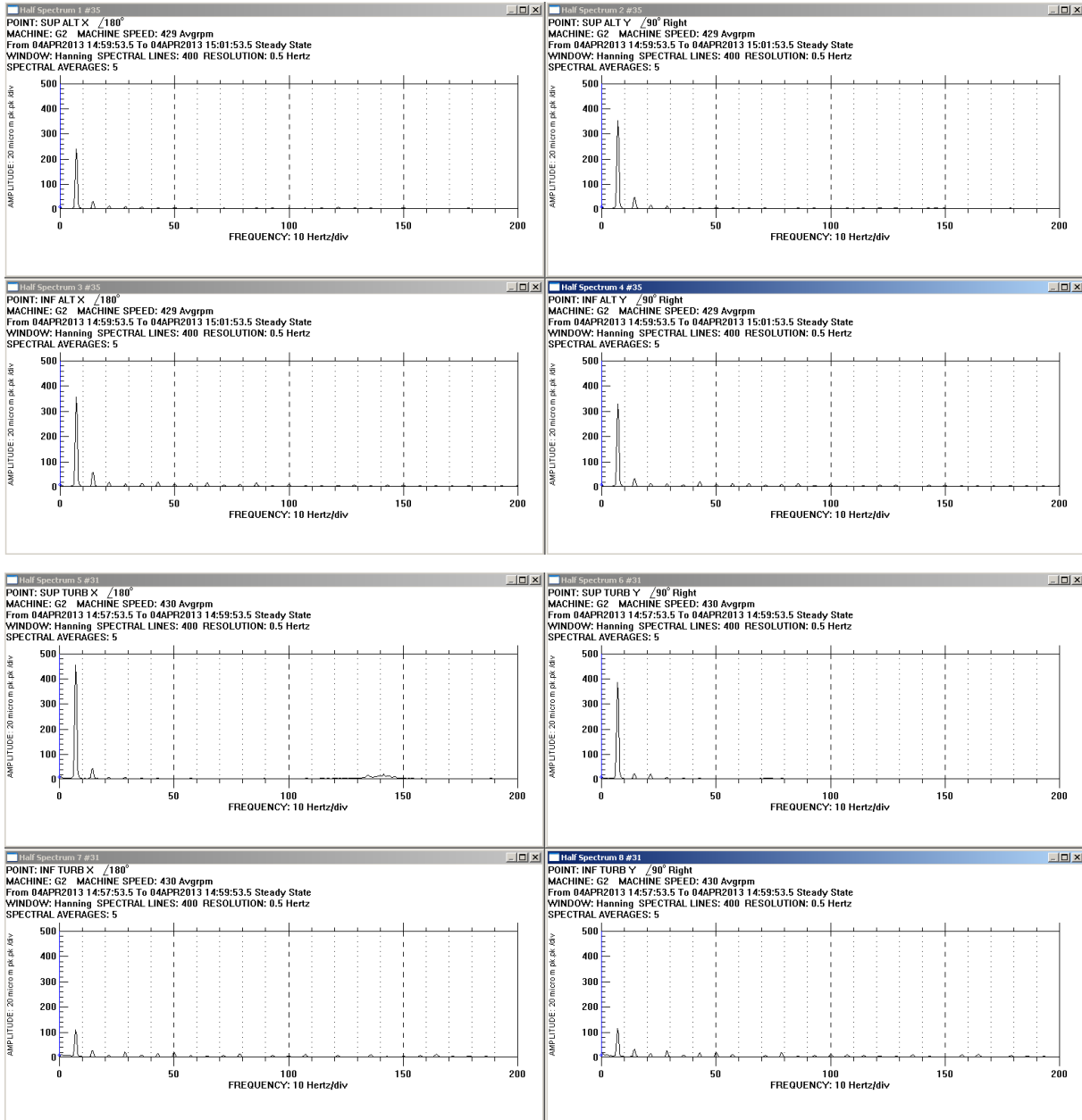
(Espectros de frequência em modo de funcionamento de gerador ao regime vazio não excitado)





## APÊNDICE VI

(Espectros de frequência em modo de funcionamento de gerador ao regime vazio excitado)

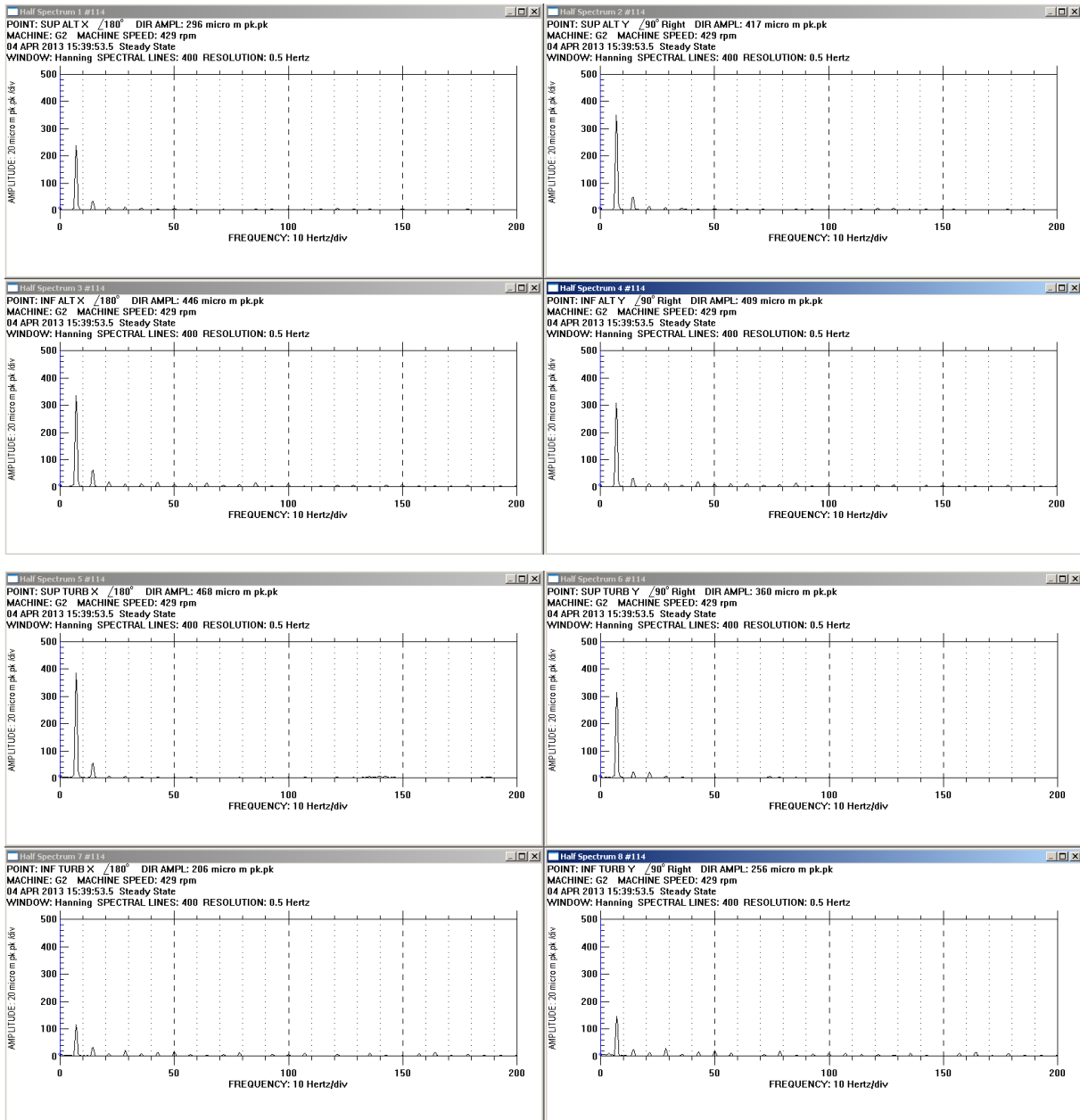






## APÊNDICE VII

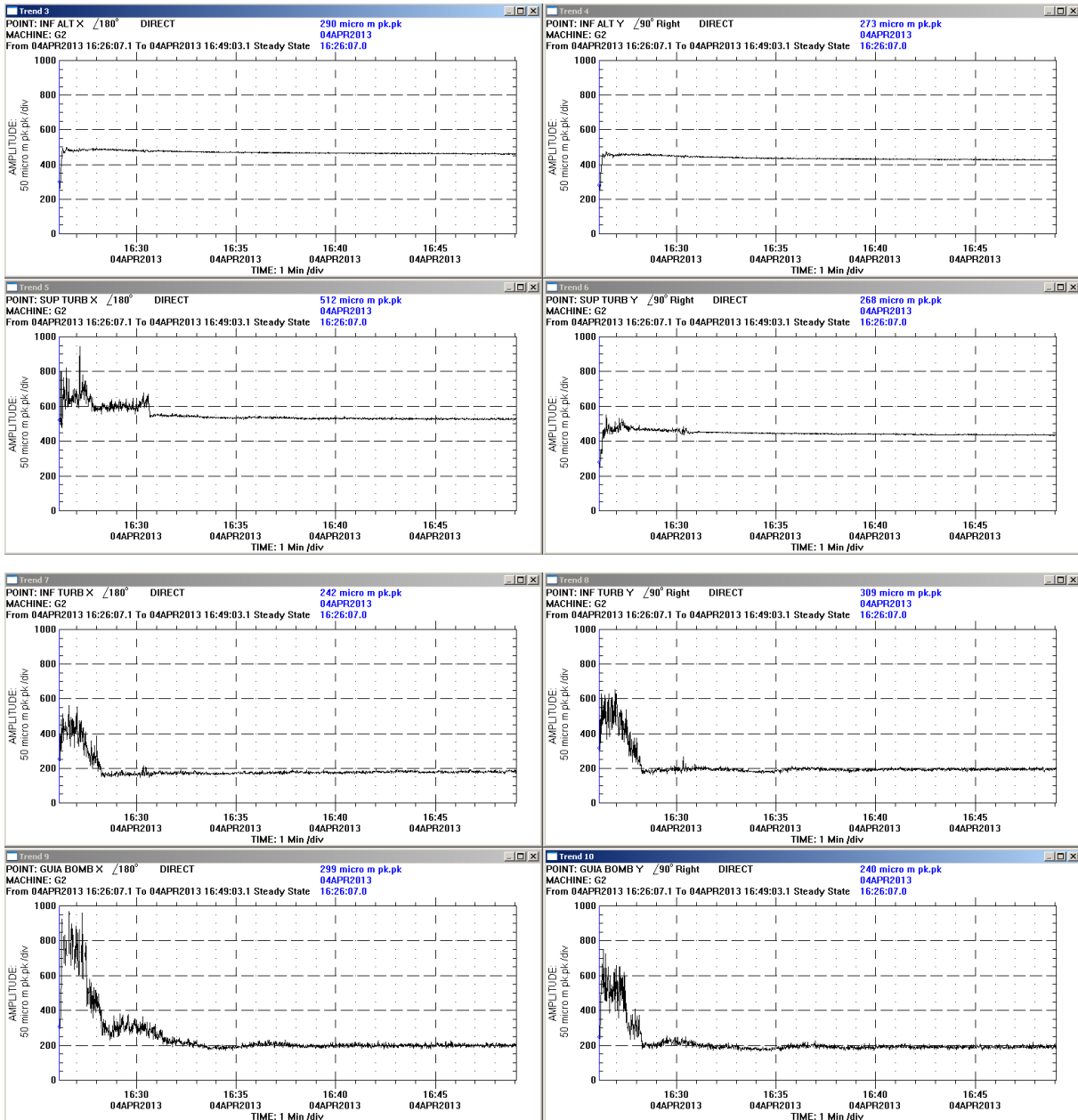
(Espectros de frequência em modo de funcionamento de gerador ao regime 30MW)





## APÊNDICE VIII

(Resultados de vibração relativa no domínio do tempo em modo de funcionamento bomba)





## **APÊNDICE IX**

(Proposta de iniciativa Lean: Optimização da operacionalidade dos sistemas de monitorização de vibrações - SMV)



**lean**  
**edpway**

Proposta de iniciativa Lean:

Optimização da operacionalidade dos sistemas de monitorização de vibrações (SMV)



### Objectivo

O propósito será encontrar o conjunto de atividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros, que serão capazes de indicar a performance ou desempenho do grupo gerador, de modo sistemático, possibilitando visualizar a necessidade quanto à realização de intervenções.

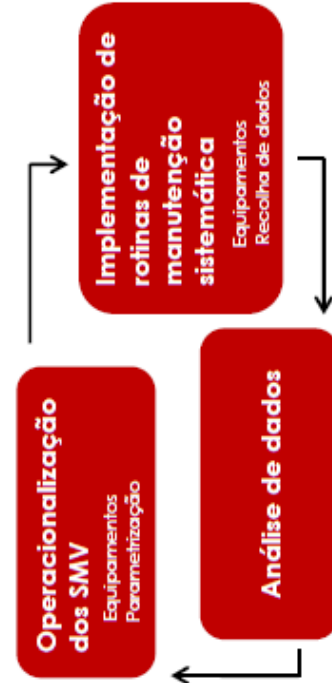
### Estado atual

É reconhecida a deficiência dos computadores dedicados à recolha de dados vibrações em alguns aproveitamentos hidroeléctricos inseridos no centro de Produção Cávado-Lima. Computadores avariados e/ou desligados, sistemas operativos obsoletos e, adicionalmente a isto, acresce a inexistência da análise sistemática de informação fornecida pelos sistemas de monitorização e protecção de vibração que poderá ser fundamental num cenário de antecipação à falha. Estas são razões suficientes a uma intervenção de melhoria e optimização do sistema de monitorização e protecção de vibrações. Além disso, a optimização destes equipamentos direccionada à recolha e utilização de dados para a implementação de um tipo de manutenção preditiva acarreta vantagens de eficiência dos grupos geradores, sobretudo no que concerne ao alargamento de vida útil dos equipamentos.

### Benefícios da iniciativa

A implementação desta iniciativa Lean está intrinsecamente ligada à manutenção dos grupos geradores. Das vantagens diretas previstas destacam-se, por exemplo:

- Planeamento de intervenções mais exaustivo e consequente aumento de disponibilidade do grupo gerador;
- Redução da substituição precoce de órgãos/equipamentos;
- Redução do número de “open, inspect and repair, if necessary”. [Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance]







## **APÊNDICE X**

(Proposta de documentação Sistemas de Monitorização de Vibrações - PHCL)





**EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A.**

**Centro de Produção Cávado-Lima**

**Sistemas de Monitorização de Vibrações (SMV)**

**DOCUMENTAÇÃO**

Junho de 2013





## ÍNDICE

<b>1 - Enquadramento</b> .....	<b>1</b>
<b>2 - Descrição de informação</b> .....	<b>2</b>
2.1 - Alto Rabagão .....	3
<b>2.1.1 - VM600 AR</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1.2 - Computador AR</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1.3 - Sensores AR</b> .....	<b>5</b>
2.2 - Vila Nova .....	7
<b>2.2.1 - VM600 VN</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2.2 - Computador VN</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2.3 - Sensores VN</b> .....	<b>8</b>
2.3 - Frades .....	12
2.4 - Salamonde .....	13
<b>2.4.1 - VM600 SD</b> .....	<b>13</b>
<b>2.4.2 - Computador SD</b> .....	<b>14</b>
<b>2.4.3 - Sensores SD</b> .....	<b>14</b>
2.5 - Vilarinho das Furnas .....	17
2.6 - Caniçada .....	18
<b>2.6.1 - VM600 CD</b> .....	<b>18</b>
<b>2.6.2 - Computador CD</b> .....	<b>19</b>
<b>2.6.3 - Sensores CD</b> .....	<b>19</b>
2.7 - Alto Lindoso .....	22
2.8 - Touvedo .....	23
<b>2.8.1 - VM600 TD</b> .....	<b>23</b>
<b>2.8.2 - Computador TD</b> .....	<b>24</b>
<b>2.8.3 - Sensores TD</b> .....	<b>24</b>
<b>3 - Internet Protocol (IP)</b> .....	<b>26</b>
<b>4 - Password's</b> .....	<b>27</b>
<b>5 - Parâmetros de recolha</b> .....	<b>28</b>
<b>6 - Alarmes/disparos</b> .....	<b>29</b>
6.1 - Alto Rabagão .....	30
<b>6.1.1 - G1 AR</b> .....	<b>30</b>
<b>6.1.2 - G2 AR</b> .....	<b>31</b>
6.2 - Vila Nova .....	32
<b>6.2.1 - G1 VN</b> .....	<b>32</b>
<b>6.2.2 - G2 VN</b> .....	<b>32</b>



<b>6.2.3 - G3 VN</b> .....	<b>32</b>
<b>6.2.4 - G4 VN</b> .....	<b>32</b>
6.3 - Frades.....	33
6.4 - Salamonde .....	34
<b>6.4.1 - G1 SD</b> .....	<b>34</b>
<b>6.4.2 - G2 SD</b> .....	<b>34</b>
6.5 - Vilarinho das Furnas .....	35
6.6 - Caniçada.....	36
<b>6.6.1 - G1 CD</b> .....	<b>36</b>
<b>6.6.2 - G2 CD</b> .....	<b>36</b>
6.7 - Alto Lindoso .....	37
6.8 - Touvedo.....	38



## 1 - Enquadramento

O presente documento engloba a documentação referente aos sistemas de monitorização de vibrações (SMV) das centrais em PRO do Centro de Produção Cávado-Lima.

O documento visa a uniformização de determinados detalhes dos SMV, a caracterização geral dos equipamentos alocados a cada central e uma organização das informações generalistas para consulta rápida e eficiente.

Note-se que o presente documento não dispensa a consulta da documentação técnica existente para questões técnicas avançadas (por exemplo, esquemas eléctricos).



## **2 - Descrição de informação**

São descritos neste capítulo informações referentes aos equipamentos instalados de cada central (composição da rack, sensores e computador dedicado), a lista de IP's, a lista de Password's, parâmetros de recolha de dados e parametrização de alarmes/disparos.



## 2.1 - Alto Rabagão

A central do Alto Rabagão tem associado a cada grupo gerador um sistema de monitorização de vibrações VM600 e respectivos sensores. Portanto, existem duas rack's sendo que cada uma está associada aos respectivos sensores, ou seja, verifica-se uma duplicação do sistema.

O computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações engloba os dois equipamentos VM600.

### 2.1.1 - VM600 AR

Os dois equipamentos VM600, em duplicado, da central do Alto Rabagão localizam-se na sala de máquinas e ambos no mesmo armário dedicado a estes sistemas.

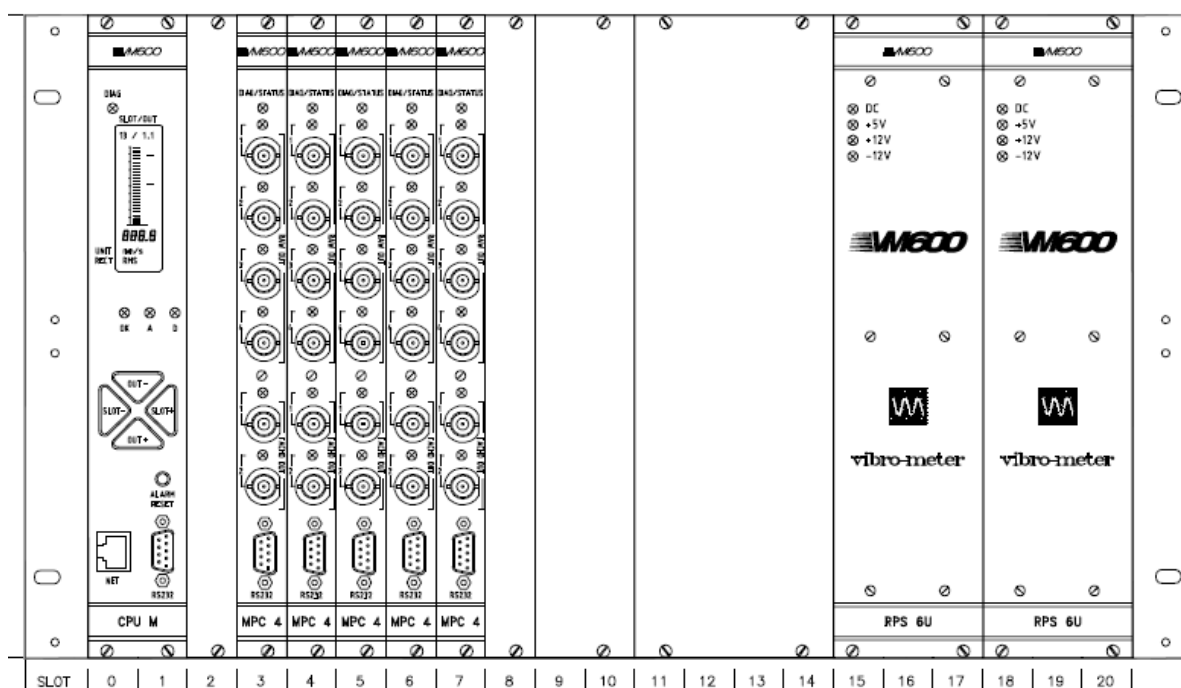


Figura 1 – Rack (vista frontal)

As cartas que contemplam a parte frontal da rack da central do Alta Rabagão são:

- CPU (1 unidade);
- MPC 4 (5 unidades);
- RPS 6U (2unidades).

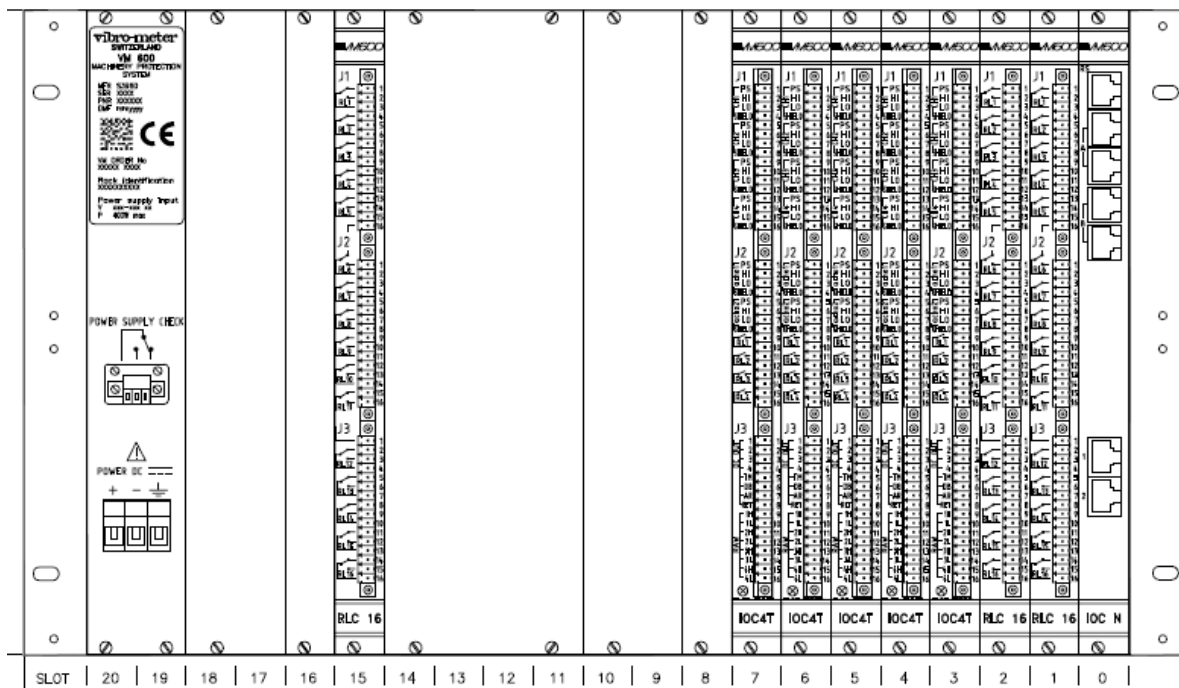


Figura 2 – Rack (vista traseira)

As cartas que contemplam a parte traseira da rack da central do Alta Rabagão são:

- RLC 16 (3 unidades);
- IOC 4T (5 unidades);
- IOC N (1 unidade).

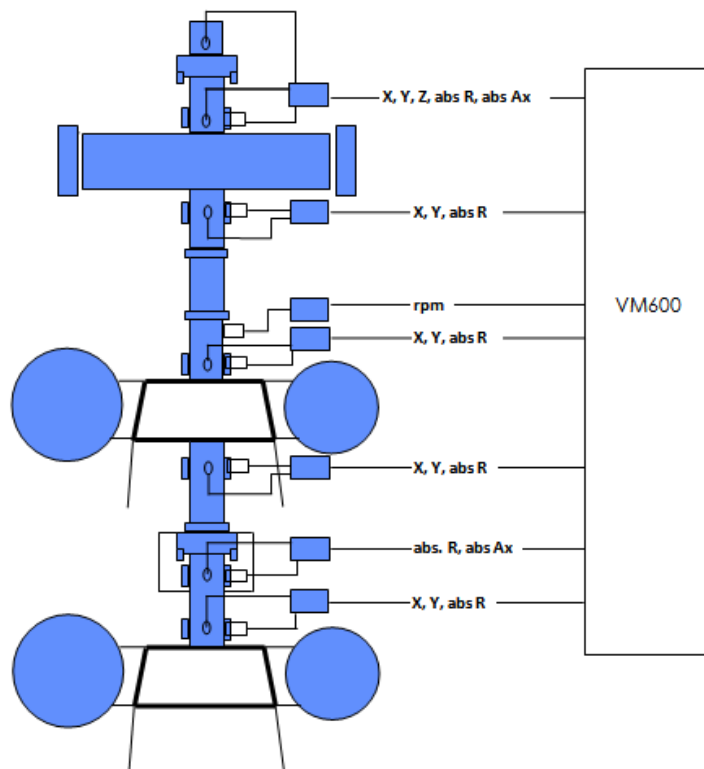
### 2.1.2 - Computador AR

O computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações da central do Alto Rabagão apresenta as seguintes características:

- Processador: i3-2100 3,1GHz
- Memória RAM: 3GB
- Hard-Disk: 500GB
- Sistema operativo: Windows XP

### 2.1.3 - Sensores AR

Como já foi referido anteriormente existe uma duplicação do sistema de monitorização de vibrações pelo que a figura referente à localização dos sensores ilustra ambos os grupos, Figura 3.



**Figura 3 – Localização dos sensores (Alto Rabagão)**

SLOT/OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
3/1.1	1 e 2	Chum. Impulso Rel. Axial	Vibração relativa axial	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3/2.1	1 e 2	Chum. Impulso Abs. Axial	Vibração absoluta axial	mm/s, RMS
3/3.1	1 e 2	Chum. Guia Sup. Alt (X)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3/3.2	1 e 2	Chum. Guia Sup. Alt (X)	Gap	mm
3/4.1	1 e 2	Chum. Guia Sup. Alt (Y)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3/4.2	1 e 2	Chum. Guia Sup. Alt (Y)	Gap	mm
3/6.1	1 e 2	Chum. Guia Sup. Alt (Smax)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk

SLOT/OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
4/1.1	1 e 2	Chum. Guia Sup. Alt Abs. Radial	Vibração absoluta radial	mm/s, RMS
4/2.1	1 e 2	Chum. Guia Inf. Alt Abs. Radial	Vibração absoluta radial	mm/s, RMS
4/3.1	1 e 2	Chum. Guia Inf. Alt (X)	Vibração relativa	μm, pk-pk
4/3.2	1 e 2	Chum. Guia Inf. Alt (X)	Gap	mm
4/4.1	1 e 2	Chum. Guia Inf. Alt (Y)	Vibração relativa	μm, pk-pk
4/4.2	1 e 2	Chum. Guia Inf. Alt (Y)	Gap	mm
4/6.1	1 e 2	Chum. Guia Inf. Alt (Smax)	Vibração relativa	μm, pk

SLOT/OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
5/1.1	1 e 2	Chum. Guia Sup. Turbina (X)	Vibração relativa	μm, pk-pk
5/1.2	1 e 2	Chum. Guia Sup. Turbina (X)	Gap	mm
5/2.1	1 e 2	Chum. Guia Sup. Turbina (Y)	Vibração relativa	μm, pk-pk
5/2.2	1 e 2	Chum. Guia Sup. Turbina (Y)	Gap	mm
5/3.1	1 e 2	Chum. Guia Sup. Turbina Abs. Rad.	Vibração absoluta radial	mm/s, RMS
5/4.1				
5/5.1	1 e 2	Chum. Guia Sup. Turbina (Smax)	Vibração relativa	μm, pk
5/7.1	1 e 2	Chum. Guia Sup. Turbina (Tacho)	Velocidade de rotação	rpm

SLOT/OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
6/1.1	1 e 2	Chum. Guia Inf. Turbina (X)	Vibração relativa	μm, pk-pk
6/1.2	1 e 2	Chum. Guia Inf. Turbina (X)	Gap	mm
6/2.1	1 e 2	Chum. Guia Inf. Turbina (Y)	Vibração relativa	μm, pk-pk
6/2.2	1 e 2	Chum. Guia Inf. Turbina (Y)	Gap	mm
6/3.1	1 e 2	Chum. Guia Inf. Turbina Abs. Rad.	Vibração absoluta radial	mm/s, RMS
6/4.1	1 e 2	Chum Comb. Bomba Abs. Axial	Vibração absoluta axial	mm/s, RMS
6/5.1	1 e 2	Chum. Guia Inf. Turbina (Smax)	Vibração relativa	μm, pk

SLOT/OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
7/1.1	1 e 2	Chum. Comb. Bomba Abs. Radial	Vibração absoluta radial	mm/s, RMS
7/2.1	1 e 2	Chum. Guia Bomba Abs. Radial	Vibração absoluta radial	mm/s, RMS
7/3.1	1 e 2	Chum. Guia Bomba (X)	Vibração relativa	μm, pk-pk
7/3.2	1 e 2	Chum. Guia Bomba (X)	Gap	mm
7/4.1	1 e 2	Chum. Guia Bomba (Y)	Vibração relativa	μm, pk-pk
7/4.2	1 e 2	Chum. Guia Bomba (Y)	Gap	mm
7/6.1	1 e 2	Chum. Guia Bomba (Smax)	Vibração relativa	μm, pk

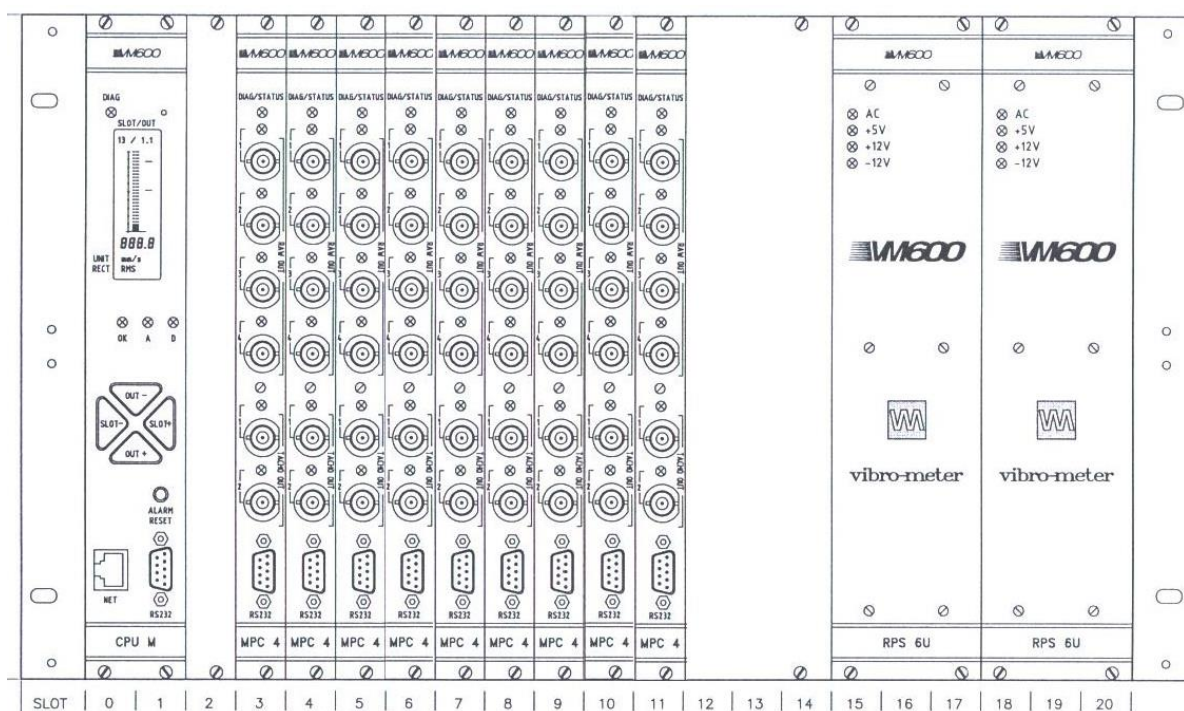
## 2.2 - Vila Nova

A central de Vila Nova tem associado aos 4 grupos geradores um sistema de monitorização de vibrações VM600 e respectivos sensores. Portanto, existem a um único equipamento VM600 está associado todos respectivos sensores.

O computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações engloba os 4 grupos geradores.

### 2.2.1 - VM600 VN

O equipamento VM600 localiza-se na sala de máquinas num armário dedicado ao mesmo.



**Figura 4 – Rack (parte frontal)**

As cartas que contemplam a parte frontal da rack da central de Vila Nova são:

- CPU (1 unidade);
- MPC 4 (9 unidades);
- RPS 6U (2 unidades).

As cartas que contemplam a parte traseira da rack da central de Vila Nova são:

- RLC 16 (2 unidades);
- IOC 4T (9 unidades);
- IOC N (1 unidade).

## 2.2.2 - Computador VN

O computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações da central de Vila Nova apresenta as seguintes características:

- Processador: AMD-2800
- Memória RAM: 2GB
- **Hard-Disk:**
- Sistema operativo: Windows XP

## 2.2.3 - Sensores VN

Os esquemas seguintes demonstram a localização dos sensores nos grupos geradores, 3 grupos Pelton (horizontais) e 1 grupo Francis (vertical).

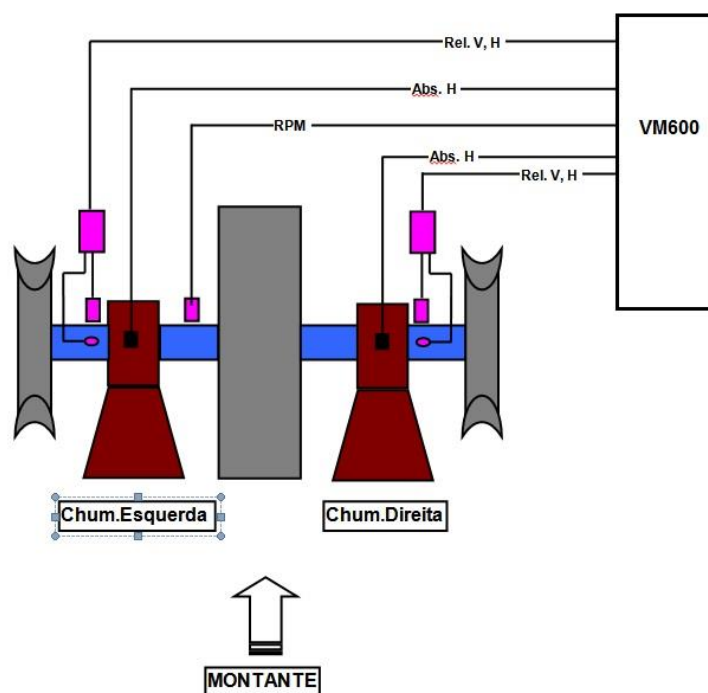


Figura 5 - Localização dos sensores dos grupos Pelton (Vila Nova)

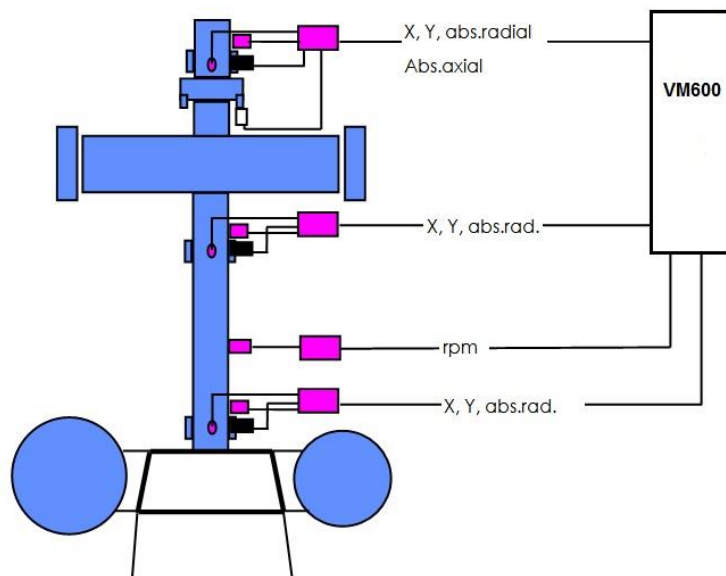


Figura 6 - Localização dos sensores do grupo Francis (Vila Nova)

SLOT / OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
3 / 1.1	1	Chumaceira Esquerda	Vibração relativa ( X )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3 / 1.2	1		Gap	mm
3 / 2.1	1		Vibração relativa ( Y )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3 / 2.2	1		Gap	mm
3 / 3.1	1		Vibração absoluta radial	mm/s,rms
3 / 5.1	1		Smáx.	$\mu\text{m}$ , pk
4 / 1.1	1	Chumaceira Direita	Vibração relativa ( X )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
4 / 1.2	1		Gap	mm
4 / 2.1	1		Vibração relativa ( Y )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
4 / 2.2	1		Gap	mm
4 / 3.1	1		Vibração absoluta radial	mm/s,rms
4 / 5.1	1		Smáx.	$\mu\text{m}$ , pk
4 / 7.1	1		Velocidade de rotação	rpm

SLOT / OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
5 / 1.1	2	Chumaceira Esquerda	Vibração relativa ( X )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
5 / 1.2	2		Gap	mm
5 / 2.1	2		Vibração relativa ( Y )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
5 / 2.2	2		Gap	mm
5 / 3.1	2		Vibração absoluta radial	mm/s,rms
5 / 5.1	2		Smáx.	$\mu\text{m}$ , pk
6 / 1.1	2	Chumaceira Direita	Vibração relativa ( X )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
6 / 1.2	2		Gap	mm
6 / 2.1	2		Vibração relativa ( Y )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
6 / 2.2	2		Gap	mm
6 / 3.1	2		Vibração absoluta radial	mm/s,rms
6 / 5.1	2		Smáx.	$\mu\text{m}$ , pk
6 / 7.1	2		Velocidade de rotação	rpm

SLOT / OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
7 / 1.1	3	Chumaceira Esquerda	Vibração relativa ( X )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
7 / 1.2	3		Gap	mm
7 / 2.1	3		Vibração relativa ( Y )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
7 / 2.2	3		Gap	mm
7 / 3.1	3		Vibração absoluta radial	mm/s,rms
7 / 5.1	3		Smáx.	$\mu\text{m}$ , pk
8 / 1.1	3	Chumaceira Direita	Vibração relativa ( X )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
8 / 1.2	3		Gap	mm
8 / 2.1	3		Vibração relativa ( Y )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
8 / 2.2	3		Gap	mm
8 / 3.1	3		Vibração absoluta radial	mm/s,rms
8 / 5.1	3		Smáx.	$\mu\text{m}$ , pk
8 / 7.1	3		Velocidade de rotação	rpm



SLOT / OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
9 / 1.1	4	Chumaceira Combinada	Vibração relativa ( X )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
9 / 1.2	4		Gap	mm
9 / 2.1	4		Vibração relativa ( Y )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
9 / 2.2	4		Gap	mm
9 / 3.1	4		Vibração absoluta radial	mm/s,rms
9 / 4.1	4		Vibração absoluta axial	mm/s,rms
9 / 5.1	4		Smáx.	$\mu\text{m}$ , pk
9 / 7.1	4		Velocidade de rotação	rpm
10 / 1.1	4	Chumaceira Inferior Alternador	Vibração relativa ( X )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
10 / 1.2	4		Gap	mm
10 / 2.1	4		Vibração relativa ( Y )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
10 / 2.2	4		Gap	mm
10 / 3.1	4		Vibração absoluta radial	mm/s,rms
10 / 5.1	4		Smáx.	$\mu\text{m}$ , pk
11 / 1.1	4	Chumaceira Turbina	Vibração relativa ( X )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
11 / 1.2	4		Gap	mm
11 / 2.1	4		Vibração relativa ( Y )	$\mu\text{m}$ , pk-pk
11 / 2.2	4		Gap	mm
11 / 3.1	4		Vibração absoluta radial	mm/s,rms
11 / 5.1	4		Smáx.	$\mu\text{m}$ , pk



### **2.3 - Frades**

A central de Frades tem os dois grupos geradores Francis equipados com um sistema de monitorização de vibrações VIBROCONTROL 4000 da Brüel & Kjaer Vibro.

Para consulta de documentação referente a este equipamento deve consultar o Volume 7 da Pasta A-10-01 da documentação mecânica referente à central de Frades.

## 2.4 - Salamonde

A central de Salamonde tem associado aos 2 grupos geradores um sistema de monitorização de vibrações VM600 e respectivos sensores. Portanto, existem a um único equipamento VM600 que está associado todos respectivos sensores.

O computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações engloba os 2 grupos geradores.

### 2.4.1 - VM600 SD

O equipamento VM600, da central de Salamonde localiza-se na sala de máquinas num armário dedicado a este sistema.

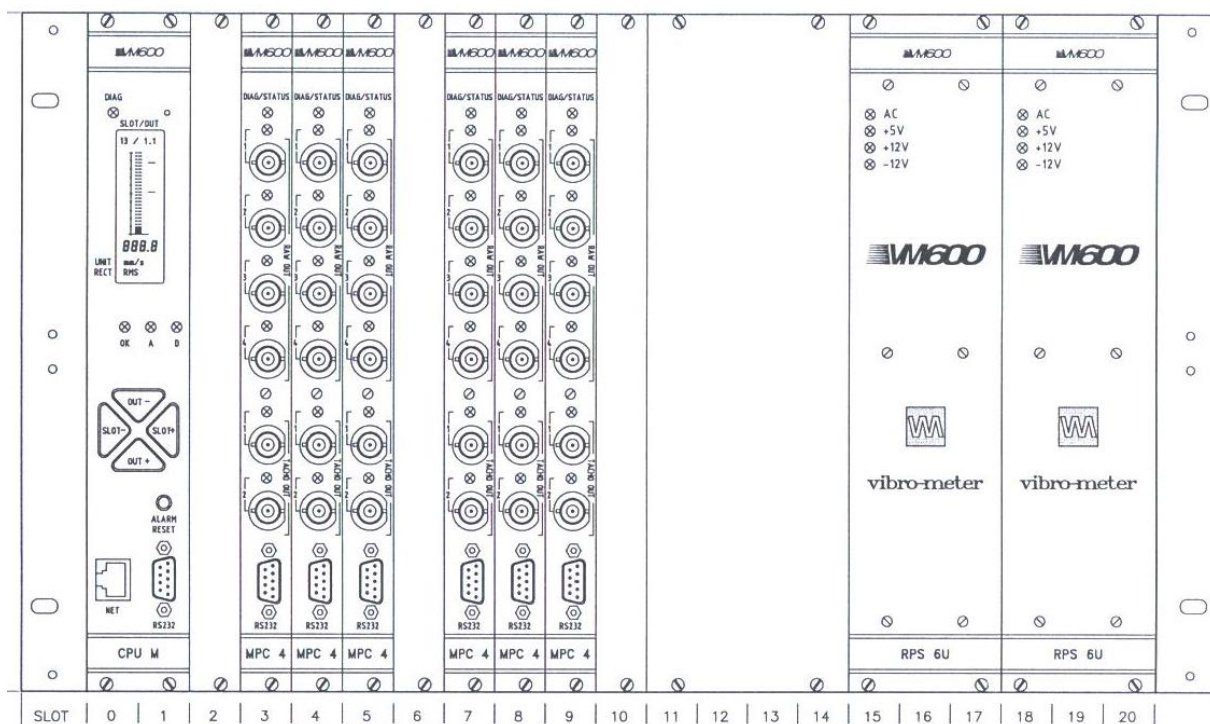


Figura 7 – Rack (vista frontal)

As cartas que contemplam a parte frontal da rack da central de Salamonde são:

- CPU (1 unidade);
- MPC 4 (6 unidades);
- RPS 6U (2unidades).

As cartas que contemplam a parte traseira da rack da central de Salamonde são:

- RLC 16 (4 unidades);
- IOC 4T (6 unidades);
- IOC N (1 unidade).

## 2.4.2 - Computador SD

O computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações da central de Salamonde apresenta as seguintes características:

- Processador: E4600 - 2,40GHz
- Memória RAM: 2GB
- Hard-Disk: 75GB
- Sistema operativo: Windows XP

## 2.4.3 - Sensores SD

O esquema seguinte ilustra a localização dos sensores nos grupos geradores.

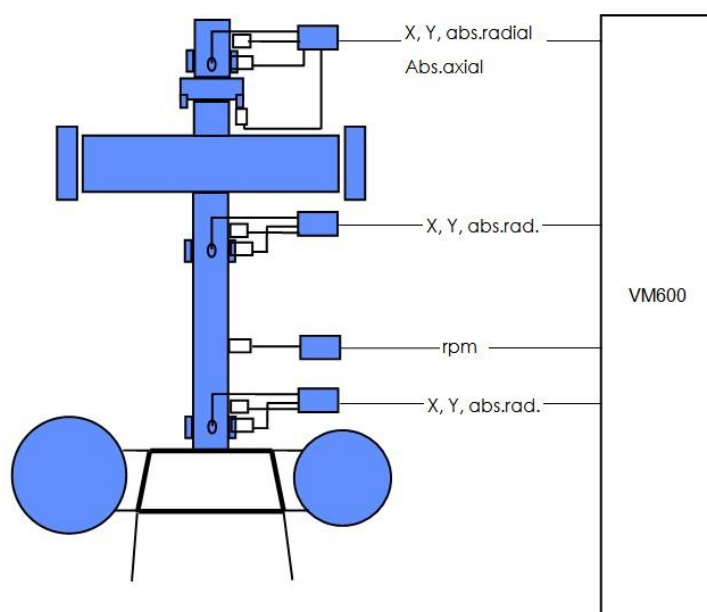


Figura 8 – Localização dos sensores (Salamonde)

SLOT / OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
3 / 1.1	1	Chumaceira impulso	Vibração absoluta axial	mm/s
3 / 2.1	1	Chumac. Sup. alternador	Vibração absoluta radial	mm/s
3 / 3.1	1	Chumac. Sup. Alternador ( X )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3 / 3.2	1	Chumac. Sup. Alternador ( X )	Gap	mm
3 / 4.1	1	Chumac. Sup. Alternador ( Y )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3 / 4.2	1	Chumac. Sup. Alternador ( Y )	Gap	mm
3 / 6.1	1	Chumac. Sup. Alternador (Smáx)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
4 / 1.1	1	Chumac. Inf. Alternador ( X )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
4 / 1.2	1	Chumac. Inf. Alternador ( X )	Gap	mm
4 / 2.1	1	Chumac. Inf. Alternador ( Y )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
4 / 2.2	1	Chumac. Inf. Alternador ( Y )	Gap	mm
4 / 3.1	1	Chumac. Inf. Alternador	Vibração absoluta radial	mm/s
4 / 5.1	1	Chumac. Inf. Alternador (Smáx )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
5 / 1.1	1	Chumac. Turbina ( X )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
5 / 1.2	1	Chumac. Turbina ( X )	Gap	mm
5 / 2.1	1	Chumac. Turbina ( Y )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
5 / 2.2	1	Chumac. Turbina ( Y )	Gap	mm
5 / 3.1	1	Chumac. Turbina	Vibração absoluta radial	mm/s
5 / 5.1	1	Chumac. Turbina (Smáx)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
5 / 7.1	1	Chumac. Turbina	Velocidade rotação	rpm

SLOT / OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
7 / 1.1	2	Chumaceira impulso	Vibração absoluta axial	mm/s
7 / 2.1	2	Chumac. Sup. alternador	Vibração absoluta radial	mm/s
7 / 3.1	2	Chumac. Sup. Alternador ( X )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
7 / 3.2	2	Chumac. Sup. Alternador ( X )	Gap	mm
7 / 4.1	2	Chumac. Sup. Alternador ( Y )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
7 / 4.2	2	Chumac. Sup. Alternador ( Y )	Gap	mm
7 / 6.1	2	Chumac. Sup. Alternador (Smáx)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
8 / 1.1	2	Chumac. Inf. Alternador ( X )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
8 / 1.2	2	Chumac. Inf. Alternador ( X )	Gap	mm
8 / 2.1	2	Chumac. Inf. Alternador ( Y )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
8 / 2.2	2	Chumac. Inf. Alternador ( Y )	Gap	mm
8 / 3.1	2	Chumac. Inf. Alternador	Vibração absoluta radial	mm/s
8 / 5.1	2	Chumac. Inf. Alternador (Smáx )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
9 / 1.1	2	Chumac. Turbina ( X )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
9 / 1.2	2	Chumac. Turbina ( X )	Gap	mm
9 / 2.1	2	Chumac. Turbina ( Y )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
5 / 2.2	2	Chumac. Turbina ( Y )	Gap	mm
9 / 3.1	2	Chumac. Turbina	Vibração absoluta radial	mm/s
9 / 5.1	2	Chumac. Turbina (Smáx)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
9 / 7.1	2	Chumac. Turbina	Velocidade rotação	rpm



## 2.5 - Vilarinho das Furnas

A central de Frades tem os dois grupos geradores Francis equipados com um sistema de monitorização de vibrações VM600 CMS da VibroMeter.

Para consulta de documentação referente a este equipamento deve consultar o Pasta A-04-09 da documentação mecânica referente à central de Vilarinho das Furnas.

## 2.6 - Caniçada

A central de Caniçada tem associado aos 2 grupos geradores um sistema de monitorização de vibrações VM600 e respectivos sensores. Portanto, existem a um único equipamento VM600 que está associado todos respectivos sensores.

O computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações engloba os 2 grupos geradores.

### 2.6.1 - VM600 CD

O equipamento VM600, da central de Caniçada localiza-se na sala de máquinas num armário dedicado a este sistema.

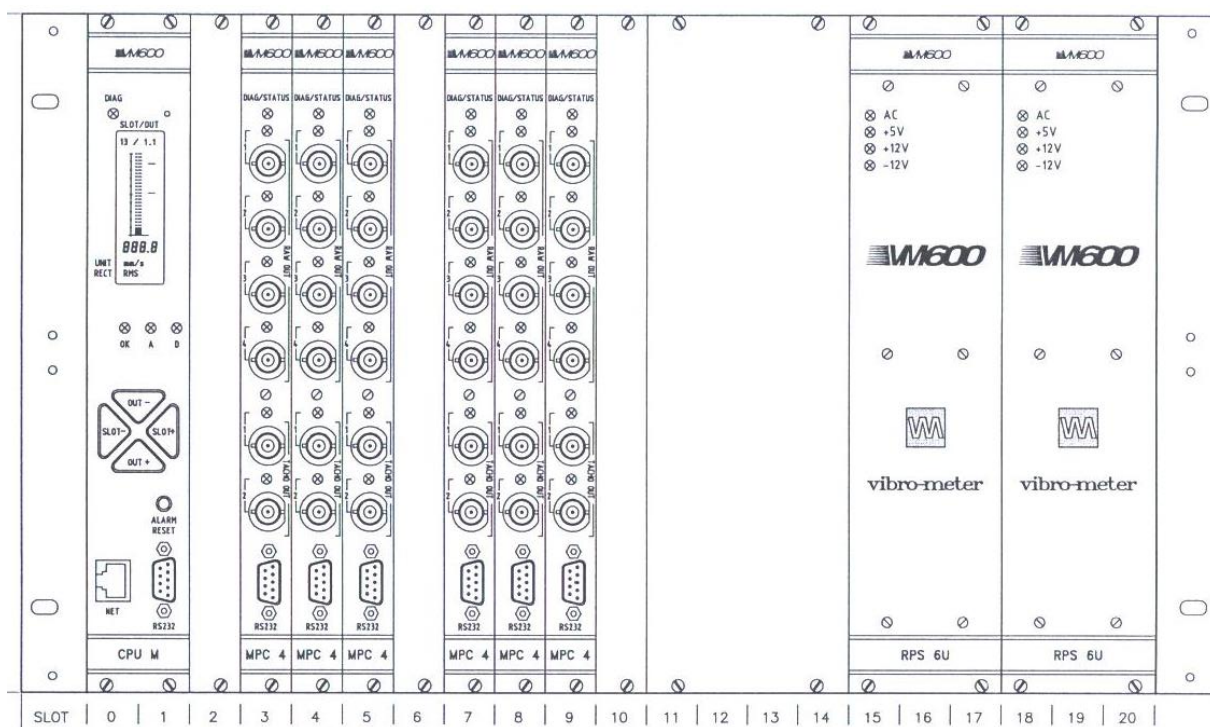


Figura 9 – Rack (vista frontal)

As cartas que contemplam a parte frontal da rack da central de Caniçada são:

- CPU (1 unidade);
- MPC 4 (6 unidades);
- RPS 6U (2unidades).

As cartas que contemplam a parte traseira da rack da central de Caniçada são:

- RLC 16 (4 unidades);
- IOC 4T (6 unidades);
- IOC N (1 unidade).



## 2.6.2 - Computador CD

O computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações da central de Caniçada apresenta as seguintes características:

- Processador: E4600 - 2,40GHz
- Memória RAM: 2GB
- Hard-Disk: 75GB
- Sistema operativo: Windows XP

## 2.6.3 - Sensores CD

O esquema seguinte ilustra a localização dos sensores nos grupos geradores.

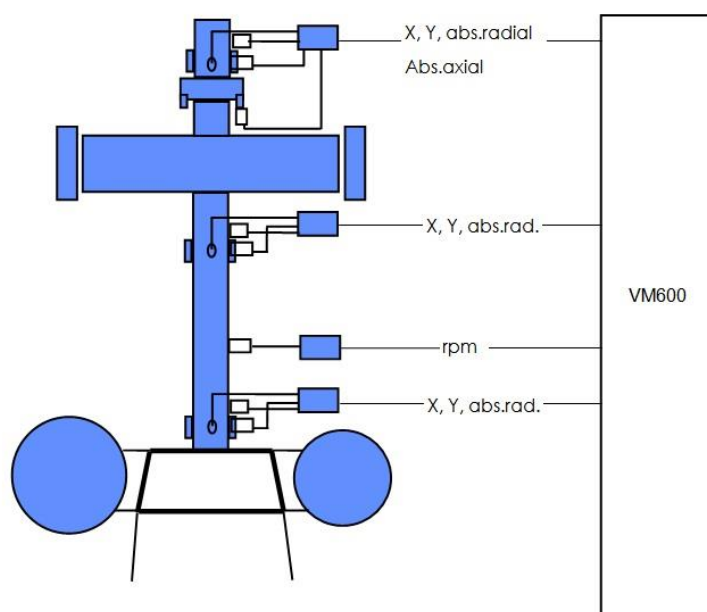


Figura 10 – Localização dos sensores (Caniçada)



SLOT / OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
3 / 1.1	1	Chumaceira impulso	Vibração absoluta axial	mm/s
3 / 2.1	1	Chumac. Sup. alternador	Vibração absoluta radial	mm/s
3 / 3.1	1	Chumac. Sup. Alternador ( X )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3 / 3.2	1	Chumac. Sup. Alternador ( X )	Gap	mm
3 / 4.1	1	Chumac. Sup. Alternador ( Y )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3 / 4.2	1	Chumac. Sup. Alternador ( Y )	Gap	mm
3 / 6.1	1	Chumac. Sup. Alternador (Smáx)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
4 / 1.1	1	Chumac. Inf. Alternador ( X )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
4 / 1.2	1	Chumac. Inf. Alternador ( X )	Gap	mm
4 / 2.1	1	Chumac. Inf. Alternador ( Y )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
4 / 2.2	1	Chumac. Inf. Alternador ( Y )	Gap	mm
4 / 3.1	1	Chumac. Inf. Alternador	Vibração absoluta radial	mm/s
4 / 5.1	1	Chumac. Inf. Alternador (Smáx )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
5 / 1.1	1	Chumac. Turbina ( X )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
5 / 1.2	1	Chumac. Turbina ( X )	Gap	mm
5 / 2.1	1	Chumac. Turbina ( Y )	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
5 / 2.2	1	Chumac. Turbina ( Y )	Gap	mm
5 / 3.1	1	Chumac. Turbina	Vibração absoluta radial	mm/s
5 / 5.1	1	Chumac. Turbina (Smáx)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
5 / 7.1	1	Chumac. Turbina	Velocidade rotação	rpm

SLOT / OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
7 / 1.1	2	Chumaceira impulso	Vibração absoluta axial	mm/s
7 / 2.1	2	Chumac. Sup. alternador	Vibração absoluta radial	mm/s
7 / 3.1	2	Chumac. Sup. Alternador ( X )	Vibração relativa	μm, pk-pk
7 / 3.2	2	Chumac. Sup. Alternador ( X )	Gap	mm
7 / 4.1	2	Chumac. Sup. Alternador ( Y )	Vibração relativa	μm, pk-pk
7 / 4.2	2	Chumac. Sup. Alternador ( Y )	Gap	mm
7 / 6.1	2	Chumac. Sup. Alternador (Smáx)	Vibração relativa	μm, pk
8 / 1.1	2	Chumac. Inf. Alternador ( X )	Vibração relativa	μm, pk-pk
8 / 1.2	2	Chumac. Inf. Alternador ( X )	Gap	mm
8 / 2.1	2	Chumac. Inf. Alternador ( Y )	Vibração relativa	μm, pk-pk
8 / 2.2	2	Chumac. Inf. Alternador ( Y )	Gap	mm
8 / 3.1	2	Chumac. Inf. Alternador	Vibração absoluta radial	mm/s
8 / 5.1	2	Chumac. Inf. Alternador (Smáx )	Vibração relativa	μm, pk
9 / 1.1	2	Chumac. Turbina ( X )	Vibração relativa	μm, pk-pk
9 / 1.2	2	Chumac. Turbina ( X )	Gap	mm
9 / 2.1	2	Chumac. Turbina ( Y )	Vibração relativa	μm, pk-pk
5 / 2.2	2	Chumac. Turbina ( Y )	Gap	mm
9 / 3.1	2	Chumac. Turbina	Vibração absoluta radial	mm/s
9 / 5.1		Chumac. Turbina (Smáx)	Vibração relativa	μm, pk
9 / 7.1	2	Chumac. Turbina	Velocidade rotação	rpm



## 2.7 - Alto Lindoso

A central de Frades tem os dois grupos geradores Francis equipados com um sistema de monitorização de vibrações PCU100 da Vibro Systems.

Não existe documentação técnica referente a este SMV.

## 2.8 - Touvedo

A central de Touvedo tem associado ao grupo gerador um sistema de monitorização de vibrações VM600 e respectivos sensores.

O computador é apenas dedicado ao sistema de monitorização de vibrações.

### 2.8.1 - VM600 TD

O equipamento VM600, da central de Touvedo localiza-se na sala de máquinas num armário dedicado a este sistema.

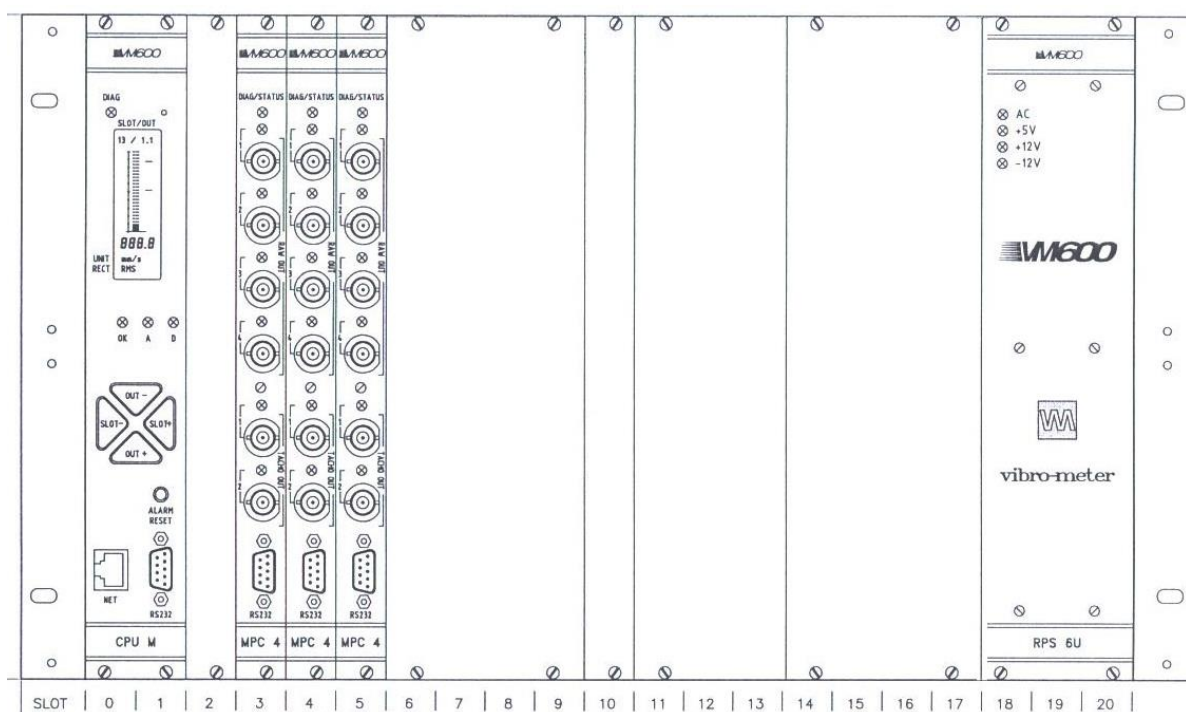


Figura 11 – Rack (vista frontal)

As cartas que contemplam a parte frontal da rack da central de Touvedo são:

- CPU (1 unidade);
- MPC 4 (3 unidades);
- RPS 6U (1 unidades).

As cartas que contemplam a parte traseira da rack da central de Touvedo são:

- RLC 16 (1 unidades);
- IOC 4T (3 unidades);
- IOC N (1 unidade).

## 2.8.2 - Computador TD

O computador dedicado ao sistema de monitorização de vibrações da central de Salamonde apresenta as seguintes características:

- Processador: E4600 - 2,40GHz
- Memória RAM: 2GB
- Hard-Disk: 75GB
- Sistema operativo: Windows XP

## 2.8.3 - Sensores TD

O esquema seguinte ilustra a localização dos sensores no grupo gerador.

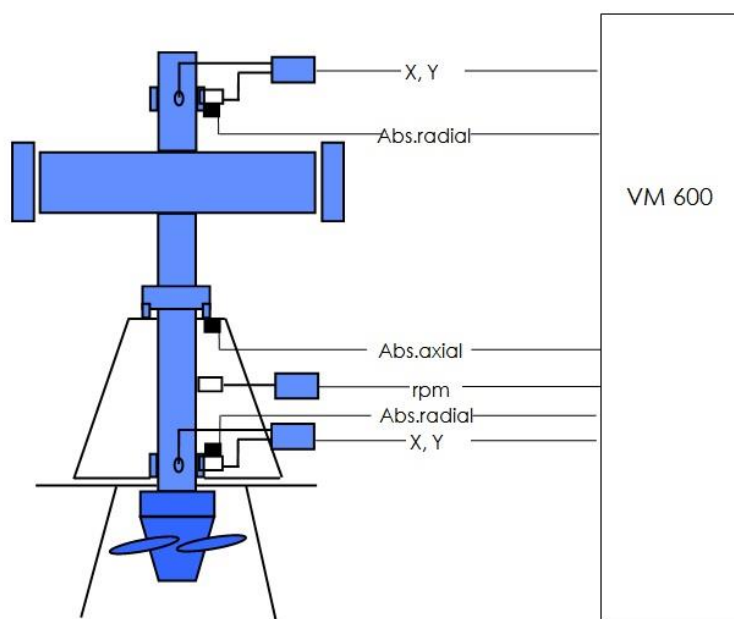


Figura 12 - Localização dos sensores (Touvedo)

SLOT / OUTPUT	GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	UNIDADE
3/1.1	1	Chumaceira guia do alternador (X)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3/1.2	1	Chumaceira guia do alternador (X)	GAP	mm
3/2.1	1	Chumaceira guia do alternador (Y)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
3/2.2	1	Chumaceira guia do alternador (Y)	GAP	mm
3/3.1	1	Chumaceira guia do alternador	Vibração absoluta radial	mm/s, RMS
3/5.1	1	Chumac. guia do alternador (Smax)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
4/1.1	1	Chumaceira combinada	Vibração absoluta axial	mm/s, RMS
4/2.1	1	Chumaceira da turbina (X)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
4/2.2	1	Chumaceira da turbina (X)	GAP	mm
4/3.1	1	Chumaceira da turbina (Y)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk-pk
4/3.2	1	Chumaceira da turbina (Y)	GAP	mm
4/4.1	1	Chumaceira da turbina	Vibração absoluta radial	mm/s, RMS
4/5.1	1	Chumaceira da turbina (Smax)	Vibração relativa	$\mu\text{m}$ , pk
4/7.1	1	Chumaceira da turbina	Velocidade de rotação	rpm

### 3 - Internet Protocol (IP)

CENTRAL	EQUIPAMENTO	IP
Alto Rabagão	VM600	
	Computador	
Vila Nova	VM600	
	Computador	
Frades	VM600	
	Computador	
Salamonde	VM600	
	Computador	
Vilarinho das Furnas	VM600	
	Computador	
Caniçada	VM600	
	Computador	
Alto Lindoso	VM600	
	Computador	
Touvedo	VM600	
	Computador	





#### 4 - Password's

PRIVILÉGIO	CENTRAL	PASSWORD
Read	TODAS	
User	TODAS	
Master	TODAS	
Super	Alto Rabagão	
	Vila Nova	
	Frades	
	Salamonde	
	Vilarinho das furnas	
	Caniçada	
	Alto Lindoso	
	Touvedo	

## 5 - Parâmetros de recolha

Os parâmetros de recolha são uniformizados a todos os sistemas de monitorização de vibrações constituídos pelo equipamento VM600. Estes parâmetros de recolha visam definir o número de recolha de dados automático no tempo e por forma a garantir que as características dos equipamentos se coadunam com o armazenamento de dados no espaço de tempo estipulado para a manutenção sistemática de recolha efectiva de dados.

Os parâmetros de recolha de dados podem ser consultados e editados (perante os privilégios de acesso necessários) em “**Timing Info**”.

Note-se que estas informações não se aplicam às centrais:

- Frades;
- Vilarinho das Furnas;
- Alto Lindoso.

Os parâmetros de recolha são os seguintes:

- **Alarm Mode Resolution:** 1 minuto;
- **Normal Mode Resolution:** 5 minutos;
- **Averaging Interval:** 6

Com os parâmetros estipulados prevê-se um tempo de recolha superior a 6 meses.



## 6 - Alarmes/disparos

A parametrização dos alarmes e disparos para os respectivos grupos geradores são definidos perante a análise histórica de dados vibratórios de cada máquina. Note-se que a parametrização não é fixa podendo sofrer alterações perante beneficiações profundas aos grupos geradores e/ou com a deterioração normal de funcionamento ao longo dos anos. Note-se também, que uma reparametrização exige um estudo exaustivo do histórico de recolha, pelo que se aconselha pelo menos um ano de recolha para um estudo mais eficiente.

Todos os alarmes e disparos são definidos perante as orientações das normas ISO 7919-5 e ISO 10816-5.

## 6.1 - Alto Rabagão

### 6.1.1 - G1 AR

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
1	Chum. de impulso	Vib.Rel.Axial			μm, pk-pk	90 s
1	Chum. de impulso	Vib.Abs.Axial			mm/s	90 s
1	Chum. guia sup do alternador (Smax)	Vib.Rel			μm, pk	90 s
1	Chumaceira guia sup do alternador	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
1	Chum. guia inf do alternador (Smax)	Vib.Rel			μm, pk	90 s
1	Chum. guia inf do alternador	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
1	Chum. guia sup da turbina (Smax)	Vib.Rel			μm, pk	90 s
1	Chum. guia sup da turbina	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
1	Chum. guia inf da turbina (Smax)	Vib.Rel			μm, pk	90 s
1	Chum. guia inf da turbina	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
1	Chum. combinada bomba	Vib.Abs.Axial			mm/s	90 s
1	Chum. combinada bomba	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
1	Chum. guia bomba	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
1	Chum. guia bomba (Smax)	Vib.Rel			μm, pk	90 s

## 6.1.2 - G2 AR

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
2	Chum. de impulso	Vib.Rel.Axial			μm, pk-pk	90 s
2	Chum. de impulso	Vib.Abs.Axial			mm/s	90 s
2	Chum. guia sup do alternador (Smax)	Vib.Rel			μm, pk	90 s
2	Chumaceira guia sup do alternador	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
2	Chum. guia inf do alternador (Smax)	Vib.Rel			μm, pk	90 s
2	Chum. guia inf do alternador	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
2	Chum. guia sup da turbina (Smax)	Vib.Rel			μm, pk	90 s
2	Chum. guia sup da turbina	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
2	Chum. guia inf da turbina (Smax)	Vib.Rel			μm, pk	90 s
2	Chum. guia inf da turbina	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
2	Chum. combinada bomba	Vib.Abs.Axial			mm/s	90 s
2	Chum. combinada bomba	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
2	Chum. guia bomba	Vib.Abs.Rad			mm/s	90 s
2	Chum. guia bomba (Smax)	Vib.Rel			μm, pk	90 s

## 6.2 - Vila Nova

### 6.2.1 - G1 VN

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
1	Chumaceira Esquerda	Vibração absoluta radial			mm/s	
1		Vib.Rel (Smax)			μm, pk	
1	Chumaceira Direita	Vibração absoluta radial			mm/s	
1		Vib.Rel (Smax)			μm, pk	

### 6.2.2 - G2 VN

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
2	Chumaceira Esquerda	Vibração absoluta radial			mm/s	
2		Vib.Rel (Smax)			μm, pk	
2	Chumaceira Direita	Vibração absoluta radial			mm/s	
2		Vib.Rel (Smax)			μm, pk	

### 6.2.3 - G3 VN

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
3	Chumaceira Esquerda	Vibração absoluta radial			mm/s	
3		Vib.Rel (Smax)			μm, pk	
3	Chumaceira Direita	Vibração absoluta radial			mm/s	
3		Vib.Rel (Smax)			μm, pk	

### 6.2.4 - G4 VN

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
4	Chumaceira combinada	Vibração absoluta radial			mm/s	
4	Chumaceira combinada	Vibração absoluta axial			mm/s	
4	Chumaceira combinada	Vib.Rel (Smax)			μm, pk	
4	Chum.Inferior Alternador	Vibração absoluta radial			mm/s	
4	Chum.Inferior Alternador	Smáx.			μm, pk	
4	Chumaceira Turbina	Vibração absoluta radial			mm/s	
4	Chumaceira Turbina	Vib.Rel (Smax)			μm, pk	



### 6.3 - Frades

## 6.4 - Salamonde

### 6.4.1 - G1 SD

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
1	Chumaceira impulso	Vibração absoluta axial			mm/s	
1	Chumac. Sup. alternador	Vibração absoluta radial			mm/s	
1	Chumac. Sup. Alternador (Smáx)	Vibração relativa			µm, pk	
1	Chumac. Inf. Alternador	Vibração absoluta radial			mm/s	
1	Chumac. Inf. Alternador (Smáx )	Vibração relativa			µm, pk	
1	Chumac. Turbina	Vibração absoluta radial			mm/s	
1	Chumac. Turbina (Smáx)	Vibração relativa			µm, pk	

### 6.4.2 - G2 SD

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
2	Chumaceira impulso	Vibração absoluta axial			mm/s	
2	Chumac. Sup. alternador	Vibração absoluta radial			mm/s	
2	Chumac. Sup. Alternador (Smáx)	Vibração relativa			µm, pk	
2	Chumac. Inf. Alternador	Vibração absoluta radial			mm/s	
2	Chumac. Inf. Alternador (Smáx )	Vibração relativa			µm, pk	
2	Chumac. Turbina	Vibração absoluta radial			mm/s	
2	Chumac. Turbina (Smáx)	Vibração relativa			µm, pk	





## 6.5 - Vilarinho das Furnas

## 6.6 - Caniçada

### 6.6.1 - G1 CD

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
1	Chumaceira impulso	Vibração absoluta axial			mm/s	
1	Chumac. Sup. alternador	Vibração absoluta radial			mm/s	
1	Chumac. Sup. Alternador (Smáx)	Vibração relativa			μm, pk	
1	Chumac. Inf. Alternador	Vibração absoluta radial			mm/s	
1	Chumac. Inf. Alternador (Smáx )	Vibração relativa			μm, pk	
1	Chumac. Turbina	Vibração absoluta radial			mm/s	
1	Chumac. Turbina (Smáx)	Vibração relativa			μm, pk	

### 6.6.2 - G2 CD

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
2	Chumaceira impulso	Vibração absoluta axial			mm/s	
2	Chumac. Sup. alternador	Vibração absoluta radial			mm/s	
2	Chumac. Sup. Alternador (Smáx)	Vibração relativa			μm, pk	
2	Chumac. Inf. Alternador	Vibração absoluta radial			mm/s	
2	Chumac. Inf. Alternador (Smáx )	Vibração relativa			μm, pk	
2	Chumac. Turbina	Vibração absoluta radial			mm/s	
2	Chumac. Turbina (Smáx)	Vibração relativa			μm, pk	



## 6.7 - Alto Lindoso

## 6.8 - Touvedo

GRUPO	LOCALIZAÇÃO DO SENSOR	MEDIDA	ALARME	DISPARO	UNIDADE	DELAY
1	Chumaceira guia do alternador	Vibração absoluta			mm/s	
1	Chumac. guia do alternador	Vibração relativa			μm, pk	
1	Chumaceira combinada	Vibração absoluta			mm/s	
1	Chumaceira da turbina	Vibração absoluta			mm/s	
1	Chumaceira da turbina (Smax)	Vibração relativa			μm, pk	

## **APÊNDICE XI**

(Proposta de instruções de manutenção sistemática dos SMV)





**EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A.**

**Centro de Produção Cávado-Lima**

**Sistemas de Monitorização de Vibrações (SMV)**

**Instruções de Manutenção Sistemática**

Junho de 2013



\*\*\*\*\* SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES \*\*\*\*\*

Verificar rack ligada.

Verificar computador ligado.

\*\*\*\*\*A

Verificar software MPS-2 em funcionamento e em gravação - REC ON (verde).

Verificar gráficos de barras com coloração verde.

Limpar armário do sistema de monitorização de vibrações (parte frontal e traseira).

\*\*\*\*\*C

Recolher dados do sistema de monitorização de vibrações.

\*\*\*\*\*E



## APÊNDICE XII

(Proposta de instruções de manual de instruções para manutenção sistemática dos SMV)





**EDP – Gestão da Produção de Energia, S.A.**

**Centro de Produção Cávado-Lima**

**Sistemas de Monitorização de Vibrações (SMV)**

**Procedimentos de Manutenção Sistemática**

Junho de 2013



<b>1 - Manutenção Sistemática Mensal .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 - Procedimentos (sistemática mensal) .....</b>	<b>4</b>
<b>2 - Manutenção Sistemática Semestral .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 - Procedimentos (sistemática semestral) .....</b>	<b>7</b>



## **1 - Manutenção Sistemática Mensal**

Pretende-se que esta manutenção sistemática mensal certifique que o sistema de monitorização de vibrações se encontra em pleno funcionamento.

Para que o funcionamento seja efectivamente correcto, os equipamentos devem estar ligados (rack e computador), o software MPS-2 deverá estar em funcionamento e em gravação e a coloração dos gráficos de barras exibidos deverão ter uma coloração verde.

Caso alguma das instruções de manutenção não seja verificada, deverá seguir os procedimentos que são ilustrados na página seguinte.

## 1.1 - Procedimentos (sistemática mensal)

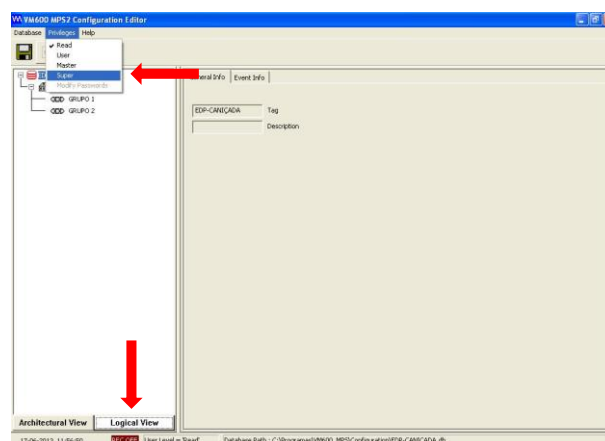
### 1. Ligar computador abrir programa MPS-2.



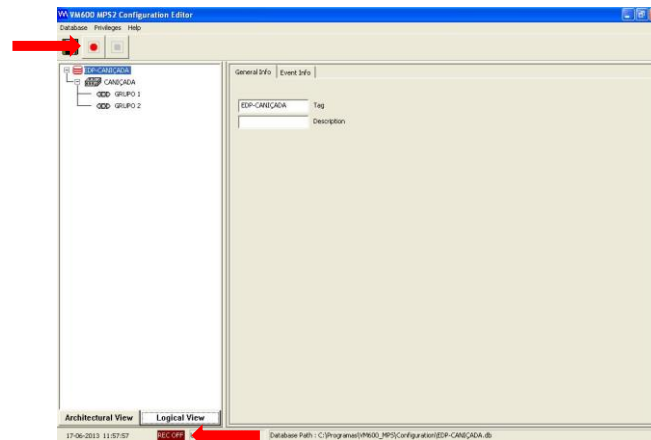
### 2. Iniciar o programa (begin)



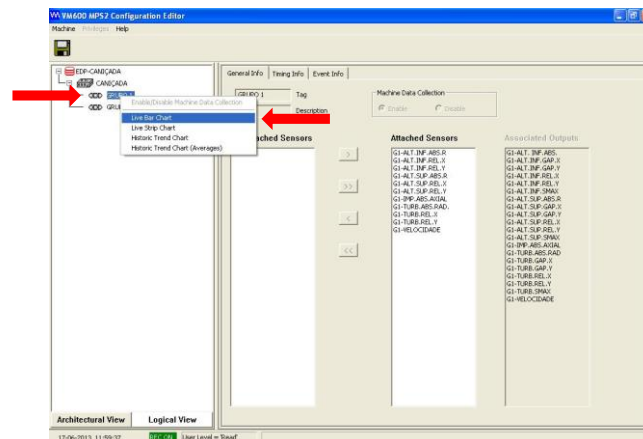
### 3. Escolher Logical View e alterar privilégios para SUPER (inserir password: \*\*\*\*).



- Colocar programa em gravação (REC) clicando na “bola” a vermelho e verificar se REC OFF (vermelho) passa a REC ON (verde).



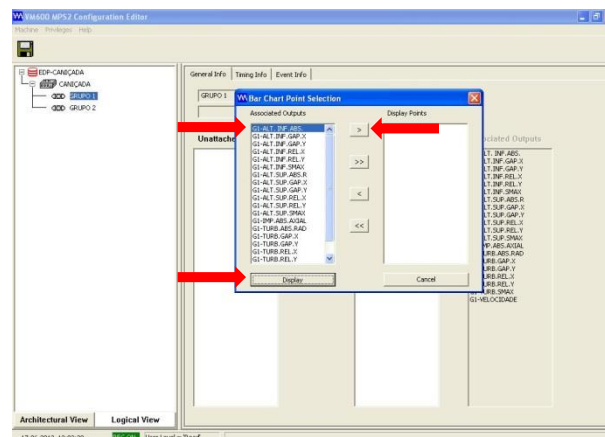
- Exibir gráficos de barras. Com o cursor do rato em GRUPO 1, pressionar botão direito do rato e escolher “Live Bar Chart”.



- Escolher outputs a exibir clicando no output e na seta para mover. Repita para todos outputs e seguidamente clique em Display.

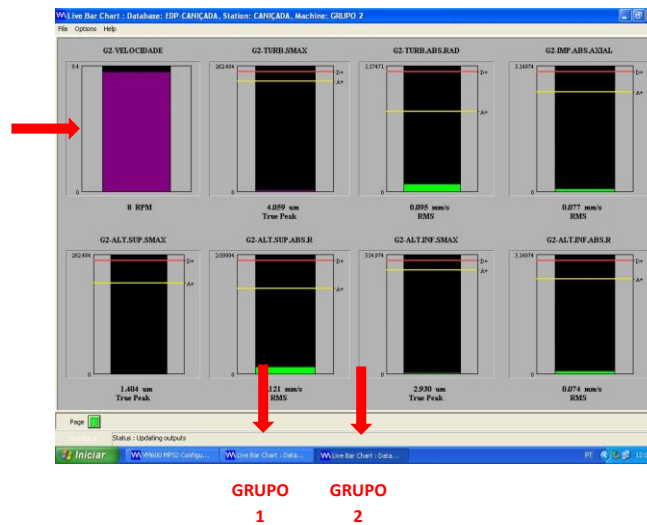
Outputs a exibir:

- ALT.INF.ABS
- ALT.INF.SMAX
- ALT.SUP.ABS.R
- ALT.SUP.SMAX
- IMP.ABS.AXIAL
- TURB.ABS.RAD
- TURB.SMAX

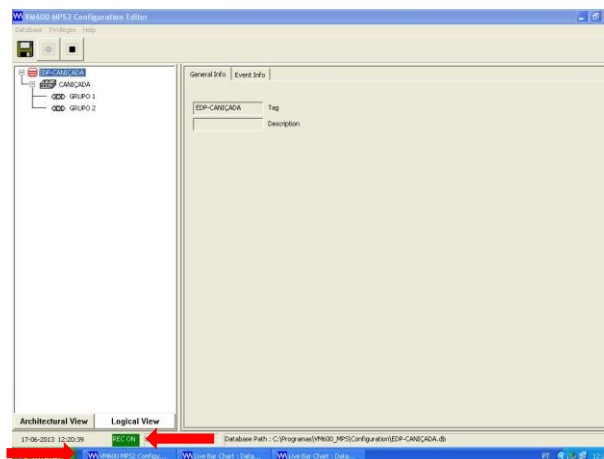


- Repetir procedimento 7 para GRUPO 2.

8. Cada janela (uma por cada grupo) deverá exibir 8 gráficos de barras (número de outputs seleccionados). Os gráficos deverão ter coloração verde (no caso de exibirem outra cor, indicia anomalias e deverá ser reportado, como exemplo na imagem em baixo).



9. Exibir permanentemente janela “VM600 MPS2 Configuration Editor” para rápida verificação aquando da manutenção sistemática semanal.







## 2 - Manutenção Sistemática Semestral

Pretende-se com esta manutenção sistemática semestral proceder à recolha de dados (histórico) do sistema de monitorização de vibrações.

### 2.1 - Procedimentos (sistemática semestral)

Para esta operação deverá fazer-se acompanhar de uma *pen drive*.

Nota: Esta operação de recolha de dados pode ser efectuada com o programa VM600 MPS-2 em funcionamento pelo que não deve ser encerrado. No final da recolha deverá deixar programa exibido.

1. Ir a “Meu computador”;
2. Ir a “Disco C”;
3. Ir a “Programas”;
4. Ir a “VM600\_MPS”;
5. Ir a “Configuration”;
6. Copiar “EDP-CANIÇADA.db” para a pen drive.

Num outro computador, com ligação à rede EDP, deverá alterar o nome da pasta segundo o modelo:

**SMV-CANIÇADA\_DIA\_MES\_ANO**

Por exemplo, no caso de a recolha ser efectuada em 17 de Junho de 2013 a pasta deverá denominar-se:

**SMV-CANIÇADA\_17\_06\_2013**

A pasta deverá ser depositada, já com o nome alterado, no disco Z:

1. Ir a “Meu computador”;
2. Ir a “Disco Z”;
3. Ir a “Z10\_Organizacional PHCL”;
4. Ir a “02 PHCL ME”;
5. Ir a “04 Manutenção”;
6. Ir a “Vibrações”
7. Ir a “Caniçada” e depositar a pasta.

