

ANÁLISE DE DADOS DE VIBRAÇÃO

Contributo para a definição do estado de condição

por

Rui Manuel Ribeiro Parreira

Dissertação apresentada como requisito

parcial para obtenção do grau de

Mestre em Estatística e Gestão de Informação

pelo

Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação

Da

Universidade Nova de Lisboa

ANÁLISE DE DADOS DE VIBRAÇÃO

Contributo para a definição do estado de condição

Dissertação orientada por

Professor Doutor Valter Martins Vairinhos
Professor Doutor Victor José de Almeida e Sousa Lobo

Novembro 2009

Agradecimentos

Este espaço é dedicado àqueles que deram a sua contribuição para que esta dissertação fosse realizada. Aos professores do ISEGI, pela forma como leccionaram o mestrado e despertaram em nós o interesse pelas matérias estudadas. Aos colegas pela partilha de um caminho nem sempre fácil e por vezes tortuoso. A todos deixo aqui o meu agradecimento sincero.

Ao Prof. Doutor Valter Vairinhos, pela forma como orientou o meu trabalho, pelos conhecimentos que me transmitiu, pela amizade que me dispensou, pelo exemplo e valores que sempre mostrou, o meu profundo reconhecimento.

Ao Prof. Doutor Victor Lobo, pela energia que põe em tudo o que faz, pelas palavras de incentivo e encorajamento nos momentos menos bons, pela disponibilidade permanente para ajudar no decurso deste trabalho, pelos ensinamentos que partilhou, por me mostrar que o *“SOM é a solução para quase todos os problemas da humanidade”*, o meu muito obrigado.

Ao Comando da Escola Naval pelo apoio dado desde a primeira hora a esta oportunidade de valorização pessoal. Aos camaradas do Departamento de Engenharia Naval – Mecânica, e particularmente ao seu coordenador Eng.º Victor Bernardino, o meu obrigado pelo apoio e amizade.

À Paula, Daniel, Sofia e Inês, obrigado pela compreensão por todos os momentos de em que não estive presente.

ANÁLISE DE DADOS DE VIBRAÇÃO

Contributo para a definição do estado de condição

RESUMO

A manutenção condicionada baseia-se na utilização de técnicas de diagnóstico com o objectivo de identificar sintomas que denunciem a existência de anomalias em máquinas num estado precoce de desenvolvimento. Entre as principais técnicas inclui-se a análise de vibrações. O processo de análise e diagnóstico pode ser altamente consumidor de tempo, e exigir pessoal muito experiente e qualificado, pelo que se apresenta nesta dissertação uma proposta de tratamento automático dos dados.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre os principais conceitos de manutenção, com particular ênfase na CBM (Condition Based Maintenance). De seguida é feita a escolha de um equipamento e recolha sistemática de dados de acordo com um plano de experiências devidamente fundamentado. É feita uma análise preliminar dos dados obtidos, usando apenas o nível global da potência das vibrações.

A contribuição mais importante desta dissertação será a proposta de um método de análise baseado nas correlações entre espectros. Os vectores originais contendo os espectros dos sinais medidos em diversos pontos são convertidos através desta técnica em vectores de características que são usados para caracterizar as diversas condições de operação. A esta transformação chamámos a transformada VMV. Essa transformada é depois usada para fazer a visualização num gráfico plano das diferentes condições usando projecções multidimensionais (MDS- Multidimensional Scalig), e poderá no futuro ser usada como input para classificadores.

É depois feita uma apresentação de resultados da aplicação destas técnicas aos dados experimentais recolhidos, que mostra a viabilidade do método proposto.

No final são tecidas algumas considerações sobre os passos a dar para tornar esta metodologia mais fiável.

VIBRATION DATA ANALYSIS

Contribute for the definition of the state condition

ABSTRACT

Condition Based Maintenance uses many different techniques to evaluate and diagnose failures at early stage of development. Among the available techniques, vibration analysis is widely used but can be highly time consuming and the personnel evolved must be technically skilled and qualified.

This thesis presents a proposal to automatically analyze data from vibrations

Chapter 2 presents a review over the main concepts of maintenance, with emphasis on Condition Based Maintenance and the use of vibration analysis in this context.

Following this, the planning and data collection procedure of vibration data on the selected machine is presented according a previous experiment plan. A preliminary analysis from the collected data using the global value of vibration is made.

The main contribution of this thesis is the proposal of a method of analysis based on the correlations among spectra. The original vectors containing the signal spectra are transformed in characteristics vectors that can be used to characterize the health condition of the machine. We called this transformation VMV- Vibration Monitoring Vector. After this transformation, we use multidimensional scaling to visualize the machine condition in a graphic. Future work can make use of the VMV transform as input to an automatic classifier.

Following, the results of this method are presented using the collected data, showing that it is a valid method.

Finally, some suggestions are made for future work and to improve this methodology.

PALAVRAS-CHAVE

Manutenção Baseada na Condição

Análise de vibrações

Diagnóstico de avarias

Prognóstico de avarias

Estatística Multivariada

Reconhecimento de padrões

KEYWORDS

Condition Based Maintenance

Vibration analysis

Failure diagnosis

Failure prognosis

Multivariate statistics

Pattern recognition

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação desta dissertação	5
1.2	Objectivos.....	5
2	Conceitos e definições de manutenção	6
2.1	Manutenção	6
2.1.2	Definições relativas aos bens	7
2.1.3	Propriedades dos bens.....	8
2.1.4	Avárias e acontecimentos	9
2.1.5	Actividades de manutenção.....	9
2.1.6	Termos relativos ao tempo	10
2.2	A evolução do conceito de manutenção	11
2.2.1	A Manutenção Baseada na Condição	14
2.2.2	A análise de vibrações como instrumento de CBM.....	15
2.2.3	Alguns conceitos básicos sobre vibrações	17
3	Metodologia.....	22
3.1	Planeamento da recolha de dados	22
3.1.1	Breve resumo histórico	22
3.2	Âmbito da experiência	23
3.3	A Selecção do desenho experimental.....	24
3.4	O processo de recolha de dados	27
3.5	Discrição do método proposto.....	29
3.5.1	– Obtenção do vector característico das observações.....	29
3.5.2	– Comparação e visualização das diferentes observações.....	31
4	Apresentação de resultados	33
4.1	Caracterização por níveis de potência.....	33
4.2	Caracterização pela transformada VMV	34
4.2.1	Apresentação dos resultados obtidos com apenas 2 características.....	36
5	Trabalho futuro	39
6	Conclusões	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Importância da manutenção (fonte: manual PRONACI da AEP 2003).....	1
Figura 2- <i>Iceberg</i> dos custos de manutenção (figura do iceberg Google images)	3
Figura 3- Evolução do conceito de manutenção (adaptado de guia SKF)	4
Figura 4- Classificação da função manutenção (ISO_13306 2006)	7
Figura 5- curva da banheira.....	12
Figura 6- Padrões de falha para diversos tipos de equipamentos	13
Figura 7- Movimento harmónico simples	18
Figura 8- Vibração característica de cada componente da máquina (fonte desconhecida).....	19
Figura 9- Domínio do tempo e da frequência	19
Figura 10- Sinal no domínio do tempo.....	20
Figura 11- Sinal no domínio da frequência	20
Figura 12-Exemplo de diagrama em cascata obtido com os dados em estudo.....	21
Figura 13- Grupo electro-bomba em estudo	27
Figura 14- Colector de dados CSI 2130 (Fonte Emerson)	28
Figura 15- Recolha de dados com o colector CSI 2130 no equipamento de estudo.....	28
Figura 16- Ilustração da transformação VMV	29
Figura 17- Projecção com MDS das médias das transformadas VMV para cada condição.	35
Figura 18 - Projecções por MDS das tranformadas VMV das 40 observações realizadas. Cada observação é identificada pela condição em que foi recolhida.	36
Figura 19 -Caracterização das médias para as condições, através de dois dos coeficientes de correlação.	37
Figura 20 - Caracterização das observações através de dois dos coeficientes de correlação.....	38

1 Introdução

A manutenção é hoje em dia uma função estratégica para o resultado das organizações. Num mercado global e extremamente competitivo é imprescindível que as empresas maximizem a eficiência dos seus sistemas produtivos e implementem sistemas de gestão da manutenção que conduzam ao aumento da produtividade (Edwards 1998). Por outro lado, às tarefas habituais da manutenção vieram juntar-se agora as tarefas associadas a critérios de segurança, à qualidade, à preservação do meio ambiente, à economia energética, à eficácia, à optimização dos processos industriais e à formação dos recursos humanos.

É pois crescente a importância da manutenção como um dos vectores fundamentais da economia das empresas (Figura 1).

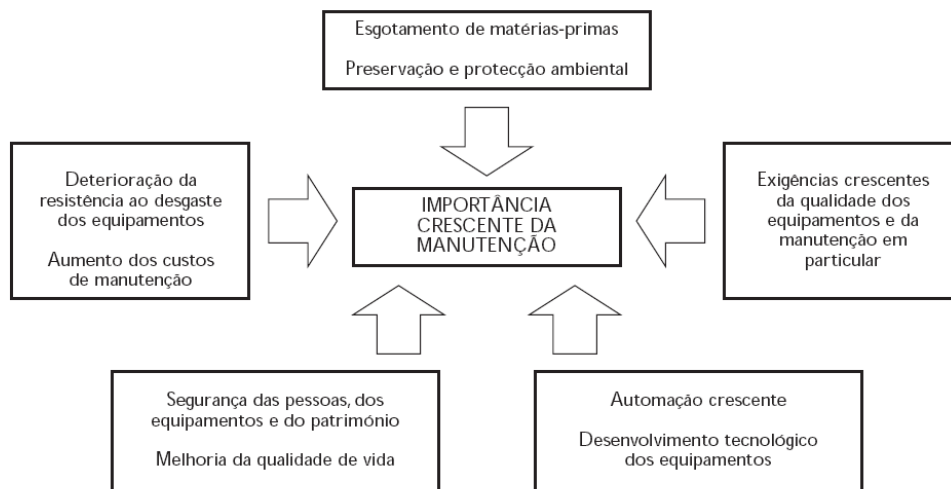


Figura 1- Importância da manutenção (fonte: manual PRONACI da AEP 2003)

A expectativa do consumidor relativamente ao desempenho dos produtos ou sistemas é bastante alta e com tendência para aumentar. Espera-se que produtos simples de consumo, como electrodomésticos ou dispositivos mecânicos, funcionem sem falhas. Para sistemas mais complexos, como sistemas informáticos ou mesmo os automóveis que conduzimos, a maioria dos consumidores tolera muito poucas falhas.

Para sistemas de elevada complexidade, como os relacionados com a indústria nuclear, com os dos transportes, ou com sistemas militares, as falhas podem ser catastróficas e é desejável elevada fiabilidade.

Como se podem atingir elevados padrões de fiabilidade? Existem muitos factores que afectam a fiabilidade. Sem pretender ser exaustivo, podemos considerar de entre os mais importantes os factores relacionadas com o projecto, selecção de materiais, processos de fabrico, a operação dos sistemas e a manutenção. A manutenção lida essencialmente com acções tendentes a reduzir a probabilidade de falha dos sistemas ou a reposicionar um sistema em falha no seu estado operacional

Segundo a Associação Portuguesa de Manutenção Industrial (Santos 2009), os custos de manutenção em Portugal podem representar um valor entre 4 a 5% do PIB o que a números de 2008 representaria cerca de 8400 milhões de euros. (Mobley 2004) afirma que, levando em conta a especificidade de cada indústria, os custos de manutenção podem significar um valor entre 15 e 60% do custo dos bens produzidos. (Eti 2006) no seu estudo sobre redução de custos na indústria através da adopção de políticas mais proactivas afirma que os custos de manutenção podem ascender aos 40% do orçamento anual. De acordo com (Souris 1992), os custos gerados pela função manutenção podem ser comparados a um *iceberg*. A parte visível, ou custos directos, corresponde aos custos com mão-de-obra, ferramentas, sobressalentes, pelas taxas horárias de intervenção e materiais de consumo aplicados. A parte invisível, ou custos indirectos, representa a maior fatia dos custos e podem ser identificados e contabilizados genericamente pelas perdas na produção e indisponibilidade do equipamento (**Error! Not a valid bookmark self-reference.**).

Existe portanto um grande potencial de redução de custos, quando adoptadas as políticas adequadas de manutenção.

A evolução do conceito de manutenção tem sido tremendo nas últimas décadas. Na década de 60, a prática comum era operar o equipamento até à sua falha e só então repará-lo. Era a época do “apaga fogos”.



Figura 2- Iceberg dos custos de manutenção (figura do iceberg Google images)

De uma forma geral, a gestão de topo considerava a manutenção um custo necessário para a realização do negócio. Com o passar dos anos este padrão de trabalhar e pensar alterou-se. Na década de 70 as fábricas começaram a adoptar algum tipo de manutenção preventiva. Nos anos 80, as unidades fabris com melhores práticas adoptaram estratégias de manutenção preditiva e, nos anos 90 o desenvolvimento de software e ferramentas de diagnóstico permitiam às equipas de manutenção informações sobre a condição das máquinas. Nos nossos dias, a exigência com a maximização da eficiência de uma indústria e do seu equipamento requer uma migração da actividade tradicional da manutenção (focada na reparação), que é tanto reactiva quanto funcional, para um processo de manutenção proactiva (focado na fiabilidade ou no risco), completamente integrada na actividade da empresa como um todo.

A evolução da manutenção preditiva para a manutenção proactiva e a integração de sistemas de apoio à decisão pode transformar a manutenção de um centro de custos para um centro de proveitos (Figura 3- Evolução do conceito de manutenção (adaptado de guia SKF)Figura 3).



Figura 3- Evolução do conceito de manutenção (adaptado de guia SKF)

O aparecimento de diversos conceitos da função manutenção encontra-se documentado por (Jonhson 1997) que menciona os seguintes modelos: Manutenção Produtiva Total, normalmente referida por TPM do inglês *Total Productive Maintenance* ; Terotecnologia; Manutenção Centrada na Fiabilidade ou RCM do inglês *Reliability Centered Maintenance*; Apoio Logístico Integrado ou ILS de *Integrated Logistic Support*; Custo do Ciclo de Vida ou LCC de *Life Cycle Cost*). Outra política de manutenção que merece destaque é a Manutenção Baseada na Condição ou em inglês CBM- *Condition Based Maintenance*. Esta política é baseada na aquisição de um ou mais parâmetros da máquina, de modo a verificar a sua condição de funcionamento, diagnosticar falhas e avaliar a vida restante do item (Mobley 2004). Podem ser encontrados na literatura diversos exemplos das vantagens da aplicação de programa de CBM em vários tipos de indústrias (Williams 1994; Jardine 2005; Pedregal 2005). Existem uma grande variedade de técnicas aplicadas na CBM (Jardine 2005; Akturk 2007), no entanto de entre estas destaca-se a análise de vibrações pela versatilidade em detectar e diagnosticar uma grande variedade de anomalias em máquinas rotativas e alternativas sem afectar a disponibilidade da máquina durante a aquisição dos dados (Pedregal 2005; Jayaswal 2008; ISO_13380:2002).

1.1 Motivação desta dissertação

Face ao exposto, a motivação para o estudo que se apresenta nesta dissertação é poder contribuir para melhorar a manutenção, pelo impacto desta nas organizações. Dentro do campo da manutenção, vão ser estudados dados de vibração num equipamento rotativo visto que esta técnica de avaliação da condição dos equipamentos pode trazer inúmeros benefícios para o gestor da manutenção. A enorme quantidade de dados gerados por sensores lança também o desafio de procurar resumir esses dados em informação útil num sistema de apoio à decisão.

1.2 Objectivos

São objectivos desta dissertação os seguintes:

- Obter e registar numa base de dados de estrutura adequada, as características vibratórias do equipamento seleccionado.
- Obter uma representação gráfica, facilmente interpretável, que permita resumir a informação da condição da máquina.
- Realizar uma análise exploratória de dados, de modo a descobrir quais as avarias que se mostrem mais difíceis de identificar e quais as mais severas do ponto de vista das vibrações.

2 Conceitos e definições de manutenção

No decorrer deste trabalho serão utilizados alguns conceitos básicos relacionados com a manutenção de equipamentos. Por isto, será apresentada abaixo, uma descrição sucinta de tais conceitos. O conjunto de conceitos e definições que se seguem estão na sua maioria vertidos em normas nacionais e internacionais (ILDINAV_802 2001; ISO_13306 2006).

2.1 Manutenção

Entende-se por manutenção, a combinação de todas as acções técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida.

Na execução das acções de manutenção podem adoptar-se diversos tipos e estratégias:

2.1.1.1 Manutenção preventiva

Manutenção efectuada a intervalos de tempo pré-determinados, ou de acordo com critérios prescritos, com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem.

2.1.1.2 Manutenção programada

Manutenção preventiva efectuada e acordo com um calendário pré-estabelecido ou de acordo com um número definido de unidades de utilização.

2.1.1.3 Manutenção sistemática

Manutenção preventiva efectuada a intervalos de tempo pré-estabelecido ou segundo um número definido de unidades de utilização mas sem controlo prévio do estado do bem.

2.1.1.4 Manutenção condicionada

Manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as acções daí decorrentes.

2.1.1.5 *Manutenção preditiva*

Manutenção condicionada efectuada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e avaliação de parâmetros significativos da degradação do bem.

2.1.1.6 *Manutenção correctiva*

Manutenção efectuada depois da detecção da avaria e destinada a repor um bem num estado em que pode realizar uma função requerida.

Apresenta-se na Figura 4 uma taxonomia para algumas das definições apresentadas.

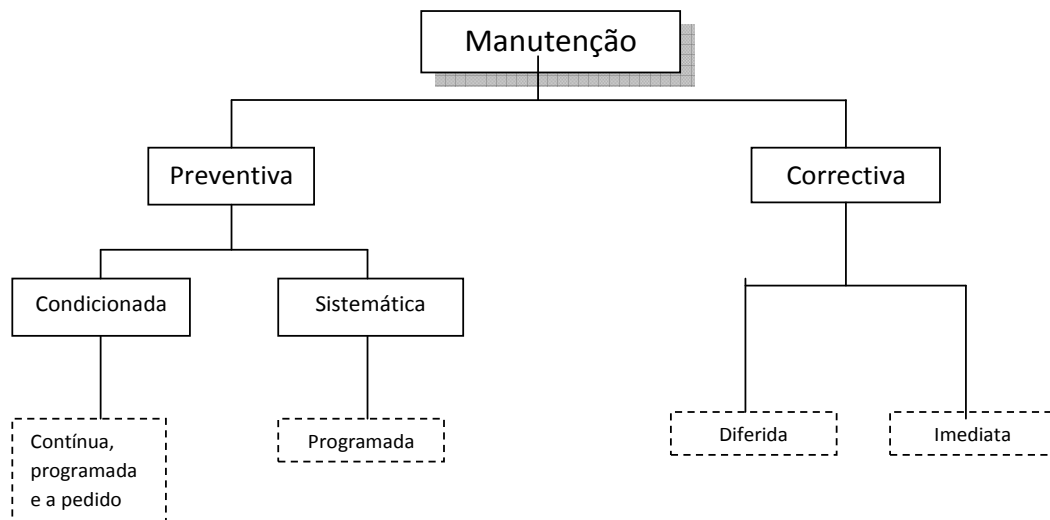


Figura 4- Classificação da função manutenção (ISO_13306 2006)

2.1.2 Definições relativas aos bens

2.1.2.1 *Bem reparável*

Um bem que, depois de uma avaria e sob determinadas condições, pode ser reposto num estado em que poderá desempenhar a função requerida.

2.1.2.2 *Bem de substituição (sobressalente)*

Bem destinado a substituir um bem correspondente, com vista a restabelecer a função requerida de origem.

2.1.3 Propriedades dos bens

2.1.3.1 Disponibilidade

Aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, num dado instante ou durante um dado intervalo de tempo, assumindo que é assegurado o fornecimento dos necessários recursos externos.

Esta aptidão depende da combinação da fiabilidade, da manutibilidade e da adequabilidade da manutenção.

2.1.3.2 Fiabilidade

Aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo.

O termo “fiabilidade”, também é utilizado como uma medida de desempenho da fiabilidade e poderá ser também definido como uma probabilidade.

2.1.3.3 Manutibilidade

Aptidão de um bem, sob condições de utilização definidas, para ser mantido ou restaurado, de tal modo que possa cumprir uma função requerida, quando a manutenção é realizada em condições definidas, utilizando procedimentos e recursos prescritos. A “manutibilidade” é também utilizada como uma medida da manutibilidade.

2.1.3.4 Vida útil

Intervalo de tempo, que sob determinadas condições, começa num dado instante e termina quando a taxa de avarias se torna inaceitável ou quando o bem é considerado irreparável na sequência de uma avaria ou por outras razões pertinentes.

2.1.3.5 Taxa de ocorrência de avarias

Número de avarias ocorridas num bem num dado intervalo de tempo, dividido por esse mesmo intervalo de tempo. Em alguns casos a unidade de tempo pode ser substituída por unidade de utilização.

2.1.4 Avarias e acontecimentos

2.1.4.1 Avaria

Cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida. Avaria refere-se a um acontecimento, enquanto “em falha” ou “avariado” é um estado.

2.1.4.2 Avaria por desgaste

Avaria cuja probabilidade de ocorrência aumenta com o tempo de funcionamento, com o número de unidades de utilização do bem ou com as solicitações que lhe são aplicadas. O desgaste é um fenómeno físico que conduz a uma perda de material ou a uma deformação do bem.

2.1.4.3 Avaria por envelhecimento

Avaria cuja probabilidade de ocorrência aumenta ao longo do tempo. Este tempo é independente do tempo de funcionamento do bem. O envelhecimento é um fenómeno físico que envolve uma modificação das características físicas e/ou químicas do material.

2.1.4.4 Degradação

Evolução irreversível de uma ou mais características de um bem relacionado com a passagem do tempo, a duração de utilização ou a uma causa externa. A degradação poderá conduzir à avaria.

2.1.5 Actividades de manutenção

2.1.5.1 Controlo de condição

Actividade executada manual ou automaticamente com o objectivo de observar o estado actual de um bem. O controlo de condição distingue-se da inspecção porque é utilizado para avaliar a evolução dos parâmetros do bem no tempo. O controlo de condição pode ser contínuo num dado intervalo de tempo ou efectuado após um número de operações, sendo geralmente efectuado sobre um bem em estado de disponibilidade.

2.1.6 Termos relativos ao tempo

2.1.6.1 *Tempo acumulado de funcionamento até à avaria*

Duração acumulada dos tempos de funcionamento de um bem, desde a primeira colocação em estado de disponibilidade até ao aparecimento de uma avaria, ou desde a sua reconstrução até à avaria seguinte.

2.1.6.2 *Tempo entre avarias*

Intervalo de tempo de calendário entre duas avarias consecutivas de um bem.

2.1.6.3 *Tempo de funcionamento entre avarias*

Duração acumulada dos tempos de funcionamento entre duas avarias consecutivas de um bem.

2.1.6.4 *Período de avarias por degradação*

Período final da vida de um bem, durante o qual a taxa de avarias é consideravelmente superior à taxa de avarias do período precedente.

2.1.6.5 *Período de taxa avarias constante*

Período na vida de em bem durante o qual a taxa de avarias é aproximadamente constante

2.1.6.6 *Ciclo de vida*

Intervalo de tempo que se inicia coma concepção e termina com a sua eliminação.

2.1.6.7 *Tempo médio entre avarias*

Esperança matemática do tempo entre avarias. É referido habitualmente na literatura pelos acrónimos anglo-saxónicos **MTTF- Mean Time to Failure** e **MTBF- Mean Time Between Failures**, embora em português não existam termos diferentes. As diferentes designações têm em conta o facto de no primeiro caso os órgãos não são reparáveis, sendo substituídos por outros novos à medida que vão falhando. No segundo caso, os órgãos são reparáveis, e após desmontagem, são reparados e voltam a ser usados.

2.2 A evolução do conceito de manutenção

O conceito de manutenção industrial está intimamente ligado com o advento da Revolução Industrial no século XVIII. Este período é caracterizado pela incorporação de grande quantidade de máquinas no desempenho de tarefas outrora essencialmente manuais.

(Moubray 1997), considera que a evolução da manutenção ao longo do tempo pode ser marcada por três gerações. A primeira geração cobre o período até à segunda Guerra Mundial. Neste período, os equipamentos ainda pouco complexos não exigiam grandes cuidados de manutenção. Estas acções que se resumiam a simples acções de conservação, lubrificação e limpeza exigiam pessoal com baixo grau de especialização.

O período da Grande Guerra, marca o início da geração seguinte. Verifica-se uma enorme pressão sobre o tecido industrial para produzir bens para o esforço de guerra, mas em simultâneo a mão-de-obra disponível é escassa. Isto levou na altura a uma crescente mecanização dos processos industriais com o aumento da complexidade e diversidade das máquinas. Esta maior dependência da indústria pelas máquinas, significa que é agora cada vez menos aceitável o estado de indisponibilidade dos equipamentos. Indisponibilidade significa prejuízo por cada hora de paragem das máquinas pelo que é exigido à manutenção que as falhas dos equipamentos possam e devam ser prevenidas. O conceito de manutenção preventiva, surgido na década de 60, significava essencialmente intervenções ou revisões dos equipamentos realizadas a intervalos regulares, como por exemplo número de horas de funcionamento, número de arranques do equipamento, número de ciclos, etc.

Durante este período assiste-se a um acentuado crescimento dos custos de manutenção quando comparados com outros custos operacionais. Este facto motivou a necessidade de desenvolver melhores procedimentos de planeamento e controlo de manutenção de modo a manter os custos a níveis aceitáveis. Fala-se agora em otimizar o custo do ciclo de vida dos equipamentos, pois aos custos de operação e exploração do cada vez mais extenso parque de máquinas há que somar os custos do capital investido.

A terceira geração segundo (Moubray 1997) tem o seu início em meados da década de 70. A introdução da informática e de novos sistemas de planeamento e gestão surgem neste período para um melhor controlo das acções de manutenção. Estudos conduzidos por (Nowlan 1978) para a companhia de aviação United Airlines chegam à conclusão que uma politica de manutenção baseada exclusivamente em acções em função do tempo de funcionamento dos equipamentos, tinha pouco ou nenhum efeito na taxa de avarias. A noção geral naquela altura, era a de que todos os equipamentos tinham um padrão de falhas comum, em que as falhas ocorriam a intervalos de tempo mais ou menos fixos, caracterizado pela curva tradicionalmente conhecida como a “curva da banheira”(Figura 5).

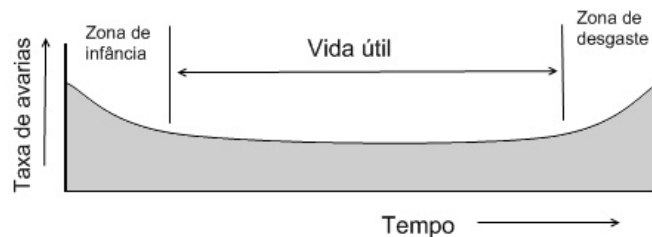


Figura 5- curva da banheira

Basicamente, assumia-se que os equipamentos se mantinham a funcionar com níveis de fiabilidade aceitáveis, durante um determinado intervalo de tempo até entrar na zona de desgaste. Pensava-se que o registo exaustivo das falhas dos equipamentos ao longo do tempo permitiria, com algum rigor, encontrar o período de vida útil e assim planear as acções preventivas um pouco antes do bem entrar na zona de desgaste e deste modo evitar as avarias. No entanto, (Nowlan 1978) mostraram que a realidade não era bem assim. No estudo que realizaram, analisaram extensivamente diversos equipamentos mecânicos e electrónicos e descobriram que os padrões de falha eram caracterizados por seis padrões diferentes apresentadas na Figura 6 **Error! Reference source not found..**

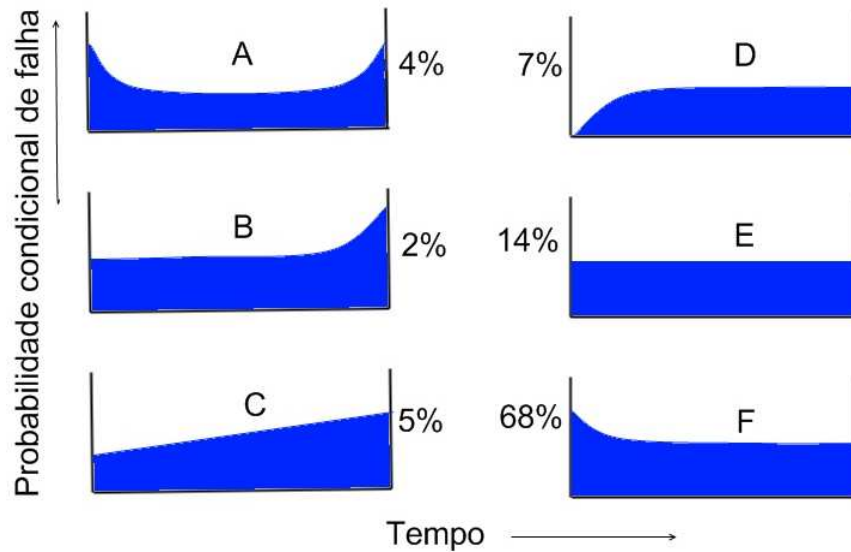


Figura 6- Padrões de falha para diversos tipos de equipamentos

Verifica-se que os equipamentos que apresentam padrões de falha aleatórios (padrões D, E, F) são 89% e que os equipamentos que apresentam padrões de falha relacionados com o tempo são 11% (padrões A,B,C). Esta constatação vai contra a ideia vigente da altura de que a fiabilidade e o tempo de operação dos equipamentos estavam intimamente ligados e que portanto quanto mais próximas estivessem as acções de manutenção menor era a probabilidade dos sistemas apresentarem falhas. A conclusão geral, é de que a não ser nos sistemas dominados por padrões de falha relacionados com o tempo, a manutenção levada a cabo a intervalos regulares, pouco ou nada contribui para o aumento da fiabilidade. Estudos posteriores realizados por Broberg (1973) na Suécia e pela marinha americana na década de 80 chegaram a conclusões semelhantes embora com diferentes percentagens de distribuição. De modo geral, à medida que os sistemas se tornam mais complexos, verifica-se que aumenta a percentagem dos padrões E e F ou seja, dos padrões de falhas aleatórios.

Estes ensinamentos colhidos por Nowlan e Heap traduziram-se no desenvolvimento do método RCM (Reliability Centered Maintenance – Manutenção Centrada na Fiabilidade) cujo conceito detalhado, e a sua implementação em diversos ambientes, podem ser consultados em vários documentos ((MIL-STD 1843 1981; ATA -Air Transport Association 1993; Smith 1993; Moubray 1997).

O nascimento desta nova forma de fazer manutenção no seio da indústria aeronáutica, foi adoptado em meados da década de 70 pela Marinha Americana, a que seguiu na década seguinte a indústria nuclear de produção de energia tendo resultado também diversas normas militares (MIL-STD) nos EUA, no RU e na indústria aeronáutica (MSG-3 Air Transport Association). A extensão às empresas civis levou ao desenvolvimento em 1999 pela Sociedade Americana de Engenharia Automóvel da norma SAE JÁ 1011. O enorme sucesso do processo RCM teve como resultados na aviação comercial a redução do número de acidentes por milhão de descolagens de 60 para apenas 2 e a proporção relacionada com falhas de equipamento de 40 para 0.3. Na Marinha Canadina são conhecidos os resultados de implementação do RCM que permitiram aumentar a disponibilidade de 12 navios para valores anteriormente conseguidos com 14 navios. Na Marinha Belga a implementação em 6 navios do tipo draga-minas conduziu à poupança de 1 milhão de Euros no primeiro ano do projecto.

2.2.1 A Manutenção Baseada na Condição

De entre as várias abordagens que surgiram com a investigação de Nowlan e Heap merece destaque o método que se denominou CBM (Condition-Based Maintenance, Manutenção Baseada na Condição). De acordo com a norma EN 13306:2001, Manutenção Baseada na Condição ou Manutenção Condicionada é a manutenção preventiva baseada na vigilância do funcionamento do bem e/ou dos parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as acções daí decorrentes.

A literatura sobre a implementação de programas de CBM é bastante vasta e apresenta várias abordagens. (Mitchell 1999) faz uma revisão histórica da monitorização da condição e da manutenção baseada na condição. Uma lista das potenciais vantagens pode ser consultada em (Williams 1994; Mobley 2004). (Bengston 2004; Bengston 2004; Akturk 2007) apresentam as componentes necessárias para implementar com sucesso um modelo de CBM. (Jardine 2005), resume a investigação e desenvolvimento no campo do diagnóstico e prognóstico das avarias em máquinas usando o CBM. Menciona várias técnicas, modelos e algoritmos empregues, nos passos necessários para a aquisição e processamento de dados para ajudar a tomada de decisão e aponta cami-

nhos para o futuro. (Wang 2000) apresenta um modelo para determinar o valor do intervalo de recolha óptimo de um parâmetro de interesse em CBM. (Banjevic 2001) apresentam software de ajuda á implementação de políticas de manutenção baseada na condição dos equipamentos. (Barata 2002) apresenta um modelo de monitorização contínua da deterioração de sistemas, usando o método de Monte Carlo. O modelo referido encontra-se inserido no âmbito de um programa de optimização de Manutenção Baseada na Condição. (Vairinhos 2006) apresentam um projecto de monitorização do estado de condição e predição de avarias através de métodos estatísticos para análise de dados multivariados gerados por sensores, ou oriundos de registos históricos de manutenção. Essas técnicas destinam-se a permitir fazer um diagnóstico contínuo do estado do sistema tendo em vista a previsão de avarias e o suporte a políticas de manutenção CBM

2.2.2 A análise de vibrações como instrumento de CBM

Conforme já referido, a manutenção condicionada baseia-se na utilização de técnicas de diagnóstico com o objectivo de identificar sintomas que denunciem a existência de anomalias num estado precoce de desenvolvimento. Dada a grande diversidade de equipamentos, órgãos e componentes a controlar, e a multiplicidade de sintomas possível, existem variadas técnicas de diagnóstico. Entre as principais técnicas incluem-se a análise de vibrações, a análise de lubrificantes, a termografia, a análise de ultra-sons, a análise de partículas de desgaste, etc. De entre estas técnicas merece destaque a análise de vibrações. (Jayaswal 2008), de entre a numerosa literatura, apresentam a importância das vibrações no contexto da manutenção. (Carnero 2003) avalia as vantagens de diversas destas técnicas e conclui que a análise de vibrações é a técnica de mais usada, porque se adequa melhor tanto aos equipamentos rotativos como aos alternativos e permite identificar um elevado número de anomalias sem influenciar a disponibilidade das máquinas. (Vairinhos 2009) apresentam diversa metodologia estatística para análise de vibrações e procuram identificar os principais problemas associados à utilização da análise de vibrações na implementação.

Outra evidência da importância da análise de vibrações no contexto da manutenção condicionada, pode ser mostrado pela análise do quadro seguinte. Este quadro,

retirado da norma (ISO_13380:2002)(Técnicas de diagnóstico e monitorização de condição) apresenta-nos a comparação das técnicas mais utilizadas e a sua adequabilidade na detecção de avarias.

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

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

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

● Prática de monitorização de condição não adequada à detecção do defeito

Verifica-se neste documento a importância da técnica de análise de vibrações como meio de diagnóstico e mostra-se a versatilidade desta ferramenta em comparação com outras técnicas. Uma das vantagens da utilização desta técnica como meio de diagnóstico é a de que é não intrusiva e permite identificar os defeitos numa fase ainda embrionária, possibilitando intervir no equipamento de forma planeada antes que surja uma avaria grave. A colecta regular de dados de vibração, para além da detecção de defeitos, pode indicar-nos tendências nos valores da vibração que de acordo com a sua evolução ao longo do tempo possibilitam a previsão do momento em que se alcançar valores de alarmes e assim planear as intervenções para o melhor momento.

Apesar das vantagens apresentadas, a realidade mostra que a implementação desta técnica tem tardado em impor-se em muitas organizações. A análise de vibrações no contexto da manutenção condicionada é um processo que exige técnicos com o domínio de grande número de conceitos sofisticados o que implica custos elevados e muito tempo. Além disto, a recolha da informação implica grande volume de dados, o que leva por vezes à necessidade de pessoas dedicadas à tarefa de análise com grande consumo de tempo.

Têm sido propostas na literatura diversas abordagens no sentido de facilitar a interpretação e processamento dos dados, integrando software dedicado em sistemas que se convencionou chamar de “sistemas inteligentes”. Estes sistemas abrangem um conjunto vasto de técnicas tanto no âmbito da automação e controlo como no âmbito da inteligência artificial: redes neuronais; lógica difusa; “wavelets”. Nestes trabalhos inclui-se (Andrade 2001) que propõe uma técnica para identificação precoce de falhas em engrenagens através da comparação de espectros no domínio do tempo usando o teste de Kolmogorov-Smirnov. (Zhan 2003; Pedregal 2005) apresentam modelos preditivos do estado de condição com a utilização de várias transformadas. (Ebersbach 2006) propõe um sistema inteligente a incorporar em software que recorre ao conhecimento acumulado em bases de dados de falhas para estabelecer regras de decisão. (Jardine 2005) na sua revisão sobre o estado da arte, apresenta como caminhos futuros o desenvolvimento de sistemas micro electromecânicos inteligentes, já incorporados nos equipamentos, e que monitorizam e avaliam continuamente o estado de condição. A este propósito, é de salientar o trabalho já efectuado por (Lobo 2008) no projecto de *detecção e identificação de avarias usando sensores de baixo custo*. Neste projecto em curso na Escola Naval - Alfeite forem usados sensores COTS com um custo aproximado de 4 Euros tendo-se concluído em testes laboratoriais que é possível obter resultados satisfatórios.

2.2.3 Alguns conceitos básicos sobre vibrações

As principais causas de vibração em máquinas são desequilíbrios, desalinhamentos, desapertos, defeitos em rolamentos, defeitos em acoplamentos, defeitos em transmissões, desgastes/excentricidades em engrenagens, forças aerodinâmicas e

hidrodinâmicas, forças electromagnéticas, aperto/fixação deficiente, atrito ou ressonância. Para este efeito ver (Harris 2002; Scheffer 2004).

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

A vibração ocorre num equipamento rotativo sempre que o centro de massa não coincida com o centro de rotação.

O modo mais simples de movimento vibratório é mostrado na Figura 7.

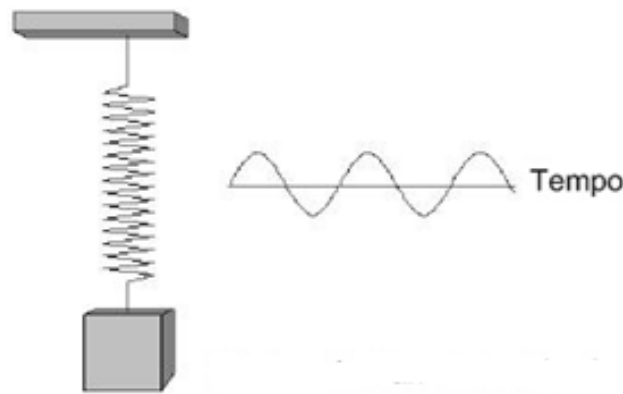


Figura 7- Movimento harmónico simples

Quando a massa é afastada da sua posição de equilíbrio e largada, o seu deslocamento, x , ao longo do tempo, t , com a frequência, f , é dado por,

$$x = A \sin(2\pi ft)$$

As vibrações podem também ser descritas em termos da velocidade e da aceleração de um ponto do corpo. A velocidade de um ponto da massa num dado instante t é dada por,

$$\frac{dx}{dt} = 2\pi f A \cos(2\pi ft)$$

E a aceleração por,

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -2\pi f A \sin(2\pi f t)$$

Num sistema mais aproximado da realidade não existe apenas uma frequência característica, mas uma frequência para cada componente rotativo da máquina. Nestas condições a forma de onda resultante não será uma sinusoidal e pode ser bem mais complexa (Figura 8). Esta representação dos fenômenos vibratórios, no domínio do tempo, especialmente quando as fontes de sinal são diversas torna difícil a interpretação do que está a acontecer. Uma forma de facilitar a análise do sinal é passar do domínio do tempo para o domínio da frequência onde a amplitude da frequência característica de cada componente vai aparecer bem discriminada (Figura 9).

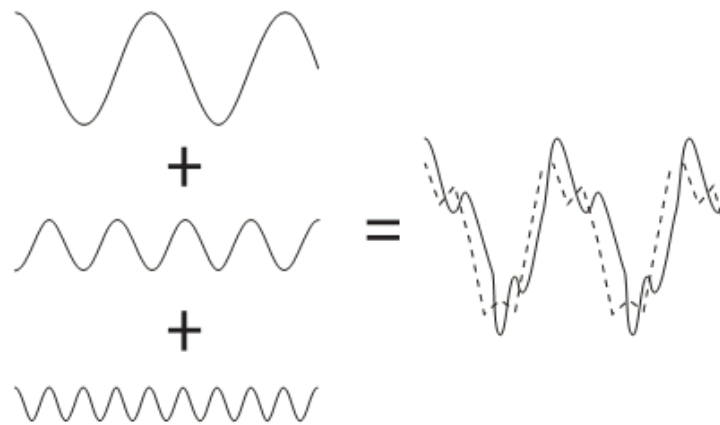


Figura 8- Vibração característica de cada componente da máquina (fonte desconhecida)

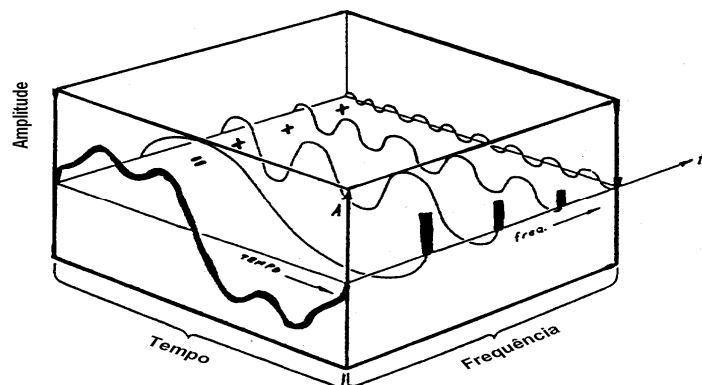


Figura 9- Domínio do tempo e da frequência

Então, para identificarmos um defeito em particular da máquina, temos de identificar a frequência característica desse defeito. Existem vários algoritmos para passar do domínio do tempo para o domínio da frequência sendo a transformada de Fourier e as *Wavelets* bastante generalizadas. A mais comum nas vibrações é a transformada de Fourier (FFT) ou mais precisamente o algoritmo FFT, que calcula a transformada discreta de Fourier num intervalo de tempo.

Mostra-se na Figura 10 e Figura 11, exemplos do sinal em tempo e em frequência obtidos em máquinas reais, usando colectores de vibração.

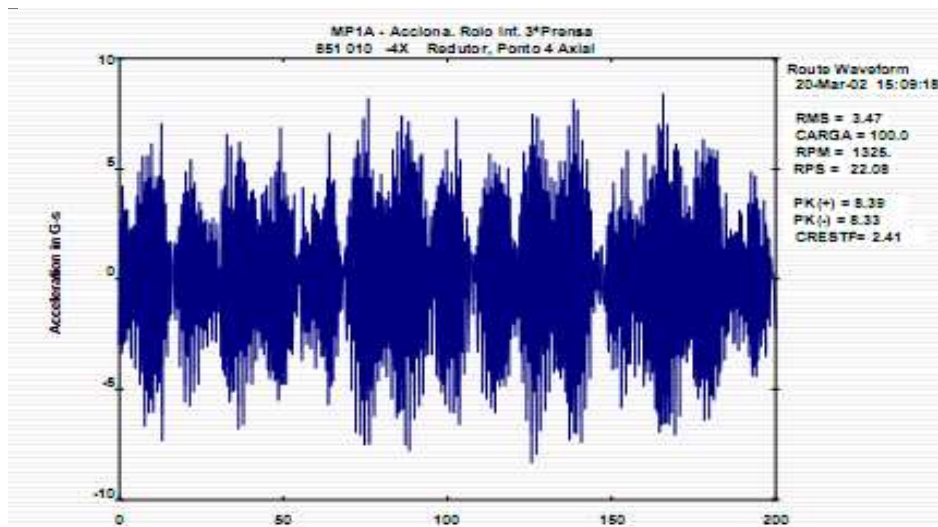


Figura 10- Sinal no domínio do tempo

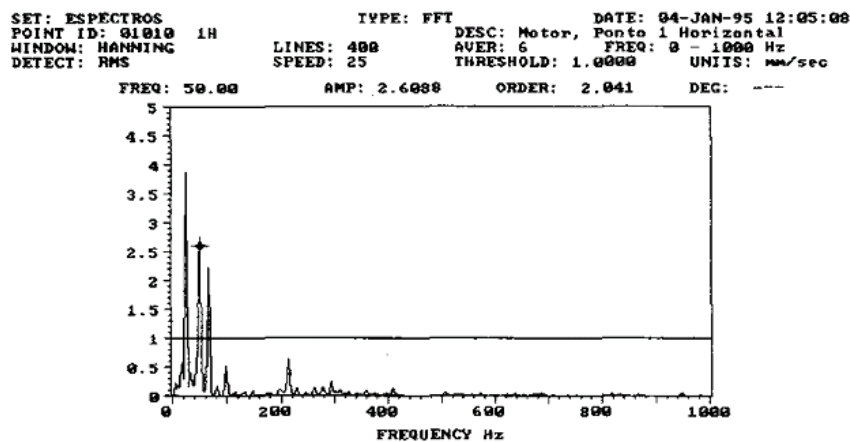


Figura 11- Sinal no domínio da frequência

Todas as causas de falha que foram mencionadas acima vão produzir um sinal com uma amplitude significativa na frequência característica do componente da máquina com defeito, permitindo desta forma a detecção e o diagnóstico de avarias.

Outras visualizações no domínio da frequência podem ser de grande ajuda na detecção de um defeito em particular. Dentro destas técnicas especiais é possível destacar a análise de envelope, a análise espectral, a análise do *cepstrum*, o método de Spike energy, o método do Shock pulse, os digramas em cascata (Figura 12) entre outros (Silva 2005).

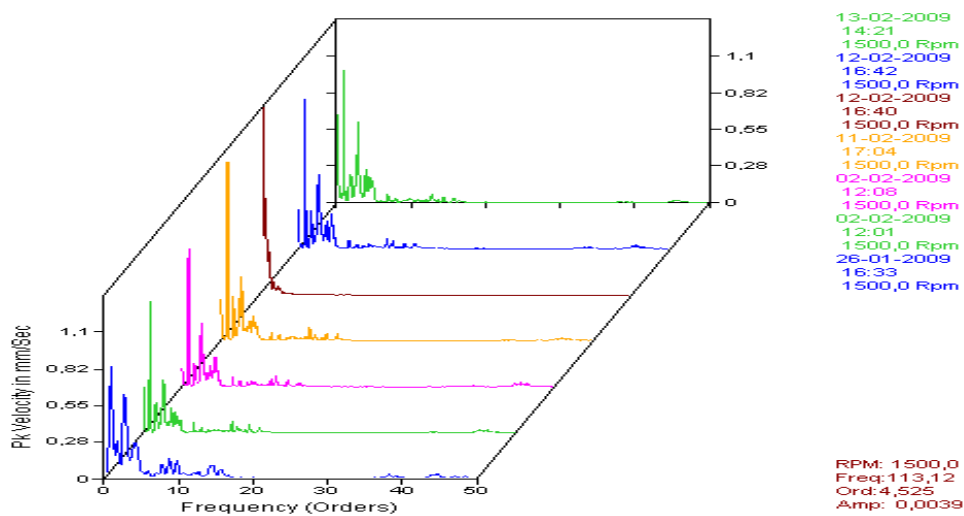


Figura 12-Exemplo de diagrama em cascata obtido com os dados em estudo

Todas estas actividades de análise e diagnóstico de avarias são altamente consumidoras de tempo e exigem a dedicação de um técnico experiente e qualificado. Existem vários organismos internacionais que criaram normas no sentido de simplificar a tarefa do analista de vibrações. No entanto a complexidade e variedade dos equipamentos tem obviado que se tenha atingido um padrão universal.

3 Metodologia

3.1 *Planeamento da recolha de dados*

3.1.1 Breve resumo histórico

Aponta-se como exemplo pioneiro de uma experiência levada a cabo de modo controlado, a experiência conduzida em 1747 por James Lind, o médico embarcado no navio HM Bark Salisbury. Lind procurava um modo de encontrar uma cura para o escorbuto, que afectava de modo generalizado a guarnição. Para o efeito, seleccionou doze marinheiros que sofriam da doença e dividiu-os em seis grupos, dando a cada grupo um *tratamento* diferente, como complemento à refeição diária, durante um período de duas semanas. Verificou-se que, embora alguns grupos apresentassem melhoras, nada se comparava ao grupo a quem fora dado citrinos, tendo a recuperação neste grupo sido espectacular, o que provava que este tratamento era substancialmente superior aos outros tratamentos.

A abordagem estatística do desenho de experiências é atribuída a Ronald A. Fisher, que na década de 1920-30 desenvolveu na estação de experimentação agrícola de Rothamsted, a norte de Londres, diversos métodos de desenho experimental aplicados na área agrícola. Para além desta aplicação em contexto agrícola, os métodos desenvolvidos por Fisher, têm sido utilizados com sucesso na indústria e no sector militar desde a década de 1940. Besse Day, enquanto trabalhava para o U.S. Naval Experimentation Laboratory, aplicou as metodologias de desenho experimental para encontrar as causas dos problemas em soldaduras, que ocorriam nos estaleiros de construção de navios, durante a II Grande Guerra. George Box foi desde a década de 1950 um impulsionador dos métodos de desenho experimental para optimização de processos químicos. Em 1950 Gertrude Cox e William Cochran publicaram o livro "*Experimental Design*" que se tornou uma obra de referência durante vários anos. No período que se seguiu à guerra e enquadrado no esforço americano de ajuda à reconstrução do Japão, W. Edwards Deming ensinou métodos estatísticos incluindo desenho experimental aos engenheiros japoneses, numa altura em que "Made in Japan" era sinónimo de fraca qualidade. Curiosamente, Deming que no seu país de origem não encontrou grande

aceitação para as suas ideias, teve vários seguidores no Japão, destacando-se de entre eles, Genichi Taguchi que desenvolveu alguns métodos ligados aos processos da qualidade. Taguchi implementou com bastante sucesso as suas ideias em empresas como a Toyota, sendo mais tarde copiado pelas empresas americanas. Desde o final da década de 1970, a indústria americana despertou para a melhoria da qualidade, e iniciativas como a “Qualidade Total” e “6-Sigma” foram transformadas em programas de sucesso em empresas como a Motorola e General Electrics.

Uma referência incontornável é Douglas Montgomery, com um vasto conjunto de obras na área do Desenho Experimental e outros métodos estatísticos.

3.2 Âmbito da experiência

Dado o conhecimento *a priori* deste tipo de equipamento e das causas mais comuns de falha, estabeleceram-se os seguintes objectivos para a recolha de dados de vibração:

- Experimentação simultânea de vários factores com o máximo de eficiência.
- Combinação dos factores que correspondem a estados de condição da máquina relevantes em termos técnicos.

Espera-se recolher um conjunto de espectros de vibração em cada ponto seleccionado da máquina, para poder relaciona-los com o estado de condição gerado artificialmente.

Os parâmetros de controlo ou factores seleccionados são os indicados no quadro seguinte. Para cada um destes factores foi decidido estabelecer dois níveis. A estes níveis foi dada a maior amplitude exequível para a realização da experiência, de modo a obter o melhor efeito dos factores na resposta. Entende-se por efeito, a variação na resposta média quando um factor mudo de um nível baixo para um nível alto.

Factores	Nível baixo (-1)	Nível alto (+1)
A- Desequilíbrio no veio	0 g	185 g
B- Desequilíbrio nas pás do ventilador	0 g	120 g
C- Desaperto lado da bomba	60 N/m ²	0 N/m ²
D- Desaperto lado do motor	30 N/m ²	0 N/m ²
E- Desalinhamento angular	0 mm	0,3 mm
F- Desalinhamento paralelo	0 mm	0,6 mm

Foram considerados como factores de ruído, ou seja, factores que não podem ser directamente controlados durante a experiencia, os seguintes:

- Carga da bomba.
- Operador do equipamento de medida.

A carga da bomba é o esforço que esta tem de realizar para comprimir o fluído, neste caso água. No sentido de minimizar este efeito, a recolha de dados foi feita à pressão constante de 1.8 Kg/cm^2 tendo-se bloqueado a válvula de descarga neste valor. Para além desta medida, foi assegurado o funcionamento do grupo electro-bomba em circuito fechado num tanque com o objectivo de limitar as variações de pressão na aspiração. Quanto ao efeito operador, foi minimizada a variabilidade na tomada das medições, fazendo com que as medições da vibração fossem adquiridas sempre pelo mesmo operador neste caso o autor da presente dissertação.

3.3 A Selecção do desenho experimental

A escolha de um desenho experimental está dependente do número de graus de liberdade associados aos efeitos principais (os efeitos dos factores isolados), à interacção entre efeitos (dois a dois ou mais) e a constrangimentos de custos e tempo associados.

No caso concreto do nosso estudo, existe um perfeito conhecimento do equipamento mecânico, o que nos leva a ter uma ideia bastante precisa de como os factores escolhidos podem interagir entre si e como podem influenciar a resposta. Assim, optou-se por um desenho factorial com seis factores, cada um com dois níveis, com a interacção entre três factores (três efeitos cruzados). A decisão de estudar três factores prende-se com o facto de que mais interacções são difíceis de ter uma explicação física.

(Pereira 2008) apresentam alguns benefícios que este tipo de experimentação pode conseguir e de que se salientam os seguintes:

- Determinação dos factores que afectam significativamente a resposta.
- Experimentação simultânea de vários factores com o máximo de eficiência.

- Determinação das estimativas dos efeitos de cada um dos factores (efeitos principais), bem como de cada uma das interacções.
- Determinação da melhor combinação de níveis de factores que permite obter valores da resposta em torno de um objectivo.
- Determinação da melhor combinação de níveis de factores que conduz à redução da variabilidade da resposta.

No presente caso, se tomássemos em consideração um planeamento factorial completo 2^k , o número de experiências necessárias para estudar todas as combinações possíveis iria ser $2^6=64$. Como o nosso objectivo se situa ao nível de conhecer os efeitos principais e apenas a interacção entre três factores, vamos optar por desenho factorial fraccionário. No nosso caso de estudo os factores a estudar são condições ou estados da máquina relevantes em termos técnicos, com o objectivo de relacionar os espectros de vibração obtidos com estes estados.

É mostrado em (Box 1978) que as interacções de ordem superior num desenho factorial podem ser insignificantes, o que significa que podemos reduzir o esforço no número de experiências. Apontam ainda estes autores como vantagem, a possibilidade de estudar outras fracções do desenho experimental, caso seja necessário conhecer informação adicional.

A representação habitual para o desenho factorial é 2^{k-p} em que p representa o número de geradores utilizados. Isto significa para o nosso caso um desenho experimental com um número de experiências a realizar de dezasseis (Box 1978). Este facto, significa que apenas necessitamos de um quarto das experiências de uma experiencia factorial completa (desenho factorial fraccional 2^{6-2}). Este desenho é considerado um desenho de resolução IV, ou seja, os efeitos principais não estão confundidos nem entre si, nem com interacções de dois factores, mas as interacções de dois factores estão confundidas umas com as outras. A construção deste desenho começa pelo desenho básico, que consiste nas dezasseis repetições do desenho factorial completo ($2^{6-2}=2^4=16$) para os factores A, B, C e D. São depois adicionados os factores geradores E e F associando os respectivos sinais “mais” e “menos” respeitantes aos níveis, com os

sinais da interacção a três factores ABC e BCD respectivamente. Mostra-se na tabela seguinte o desenho factorial para a experimentação do caso em estudo.

Ordem			Desenho Básico					
Padrão	Aleat.		A	B	C	D	E=ABC	F=BCD
1	l	7	-	-	-	-	-	-
2	a	13	+	-	-	-	+	-
3	b	4	-	+	-	-	+	+
4	ab	9	+	+	-	-	-	+
5	c	1	-	-	+	-	+	+
6	ac	2	+	-	+	-	-	+
7	bc	15	-	+	+	-	-	-
8	abc	3	+	+	+	-	+	-
9	d	6	-	-	-	+	-	+
10	ad	16	+	-	-	+	+	+
11	bd	14	-	+	-	+	+	-
12	abd	5	+	+	-	+	-	-
13	cd	11	-	-	+	+	+	-
14	acd	10	+	-	+	+	-	-
15	bcd	2	-	+	+	+	-	+
16	abcd	8	+	+	+	+	+	+

A execução desde plano de experiencias conduziu à recolha de dados de vibração em 13 pontos do equipamento, sob 16 condições diferentes, com várias réplicas, tendo-se obtido 546 ficheiros de texto correspondendo a 40 observações no formato que se apresenta no anexo 1.

De modo a facilitar a análise dos dados, e após algumas tarefas de pré-processamento, estes foram dispostos em folhas de cálculo com a estrutura exemplificada que se apresenta no anexo 2. Cada folha reúne a informação dos pontos P1 a P13 em cada condição experimental da máquina. Posteriormente e dados o volume de dados, reorganizou-se esta informação apenas para os pontos P1, P5, P7 e P8, para demonstrar a validade do método proposto. A nova matriz dos dados apresenta em cada coluna a informação sobre a condição da máquina, a indicação sobre a condição experimental e a informação em frequência dos pontos referidos. Finalmente, estes dados foram processados pelo programa Matlab, cujo código produzido se apresenta no anexo 4, de modo a concretizar os passos descritos na metodologia que se descreve de seguida.

3.4 O processo de recolha de dados

Os dados de vibração obtidos foram recolhidos num grupo electro-bomba, que foi montado com o propósito de servir de modelo para um simulador de vibrações. Este equipamento foi recuperado do depósito de material obsoleto pela pessoal da oficina de mecânica da Escola Naval. A escolha deste equipamento rotativo, logo com boas condições para aplicar os métodos de análise de vibrações, ficou a dever-se à simplicidade do seu funcionamento e à sua grande utilização em ambiente industrial.

São mostrados na Figura 13 os diversos pontos do equipamento que foram escolhidos de modo a poder recolher a melhor informação possível.

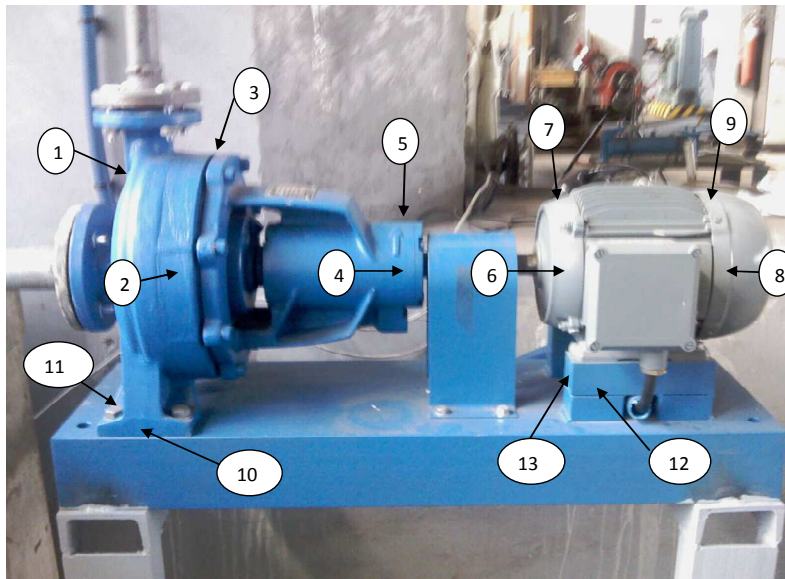


Figura 13- Grupo electro-bomba em estudo

O equipamento de medição e colecta de vibrações utilizado foi o modelo CSI 2130 da Emerson (Figura 14) cujas características podem ser consultadas em com mais detalhe em www.assetweb.com. A colecta de dados (Figura 15) processa-se após elaboração de uma rota de recolha no software instalado num PC portátil e que depois é descarregada para o aparelho. Após a recolha de dados para o aparelho de medição, estes são transferidos para o PC onde são armazenados numa base de dados num formato definido pelo fabricante do equipamento de medição. Entre outras características que tornaram este aparelho interessante para o projecto, merece destaque a possibilidade de exportar os dados recolhidos permitindo fazer o tratamento dos dados indepen-

dente do software do fabricante. Este facto pode parecer de menor importância, mas no início do projecto quando procurávamos o acesso aos registos históricos em outras base de dados de vibrações da Marinha deparámo-nos com a impossibilidade exportar os dados para fora dessas bases de dados características de cada fabricante de software, logo incompatíveis com o software de utilização comum.



Figura 14- Colector de dados CSI 2130 (Fonte Emerson)



Figura 15- Recolha de dados com o colector CSI 2130 no equipamento de estudo

Os dados exportados do equipamento de medição estão em formato texto e têm a estrutura que se apresenta no Anexo 1. Como se pode verificar, obtém-se no cabeçalho a informação sobre o equipamento e sobre o ponto de medida, seguida de um con-

junto de informações sobre o histórico das medições efectuadas até à data e indicação do valor global de vibração. De seguida vem a informação do sinal recolhido tanto no domínio do tempo (Waveform Values) com 1024 linhas, como no domínio da frequência (Spectra Values) 1598 linhas. De forma a recolher a informação de forma estruturada e visto que há vários factores de em jogo, foi decidido proceder a um plano de experiencias que se descreve de seguida.

3.5 Descrição do método proposto

O método que nos propomos utilizar para fazer a análise e visualização da condição da máquina baseada na medição de vibrações pode ser decomposto em 2 partes:

- a) A transformação do sinal medido pelo analisador de vibrações nos diversos pontos da máquina, num vector de referência que caracteriza essa observação;
- b) A comparação e visualização desse vector característico.

3.5.1 – Obtenção do vector característico das observações

O método que se propõe para obter uma descrição do estado da máquina, denominado transformada de VMV (**Vector de Monitorização de Vibrações**), consiste em usar como características as correlações entre espectros obtidos em diversos pontos da máquina. Veja-se a Figura 16 onde a cadeia de transformações é sintetizada graficamente.

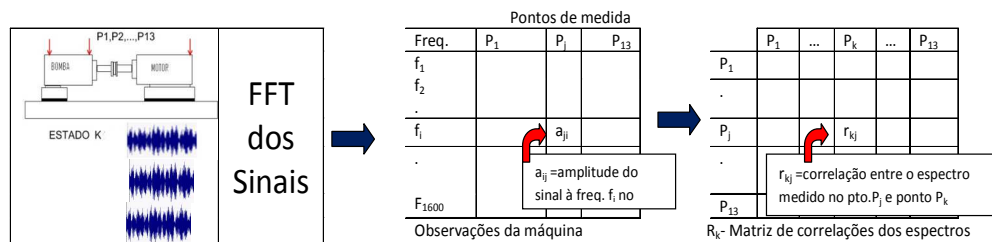


Figura 16- Ilustração da transformação VMV

Cada observação corresponde a um estado da máquina, uma vez que se refere a uma situação ou condição física forçada na máquina, com impacto no seu funcionamento. Para cada observação, são feitas medições do sinal vibratório em diversos pontos (pré-determinados e fixos) da máquina. Os pontos de medição que compõe a observação são indexados por 1,2,...,j,...,13.

Uma vez que os pontos não são medidos simultaneamente, os sinais da amplitude em função do tempo não são directamente comparáveis. No entanto se assumirmos que os sinais são estacionários, os seus espectros não variam no tempo, logo espectros medidos em momentos diferentes são comparáveis. Por esse motivo, transformando o sinal no tempo na sua transformada de Fourier, obtêm-se para cada momento de observação um vector de amplitudes correspondentes às potências nas frequências $f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_{1598}$ (o que na realidade representa uma gama de frequências de 0 a 5 kHz). O cálculo destas transformadas é feito pelo próprio equipamento de medição (CSI 2130).

Ficamos assim, para cada observação da máquina com um conjunto de dados base. Esse conjunto tem 13 espectros, cada um com 1598 componentes que representam as amplitudes de vibração (intensidades) correspondentes a cada uma das frequências. Os dados base que representam as medições feitas têm um número de coeficientes muito elevado: $13 \times 1598 = 20774$. Para muitas das tarefas que pretendemos mais tarde efectuar, é importante ter uma representação mais sucinta das observações.

A opção foi representar cada observação pela matriz de correlações (13x13) entre os vectores representativos dos pontos de medição. A justificação é a seguinte: cada estado/condição experimental corresponde a uma situação física bem definida para a qual faz sentido tentar expressar as amplitudes num ponto em função das amplitudes nos outros pontos através de expressões lineares. Essas relações, em princípio, serão diferentes para estados da máquina distintos. A matriz de correlações entre espectros traduz precisamente estas relações. Essa Matriz é simétrica de diagonal unitária. Assim sendo, a informação útil está toda contida nos coeficientes acima da diagonal, ou seja, em $(13 \times 13 - 13) / 2 = 78$ coeficientes. Para simplificar, esses coeficientes são guardados

num vector, que constitui o vector VMV. O primeiro coeficiente desse vector é a correção entre o espectro em P1 e P2, o 2º entre P1 e P3, o 3º entre P1 e P4, e assim sucessivamente, percorrendo a matriz de correlações por linhas.

3.5.2- Comparação e visualização das diferentes observações.

Como explicado anteriormente, foram criados 16 estados de condição diferentes para os quais foram feitas observações. Esses estados são designados por I,A,B,AB...ABCD, conforme e combinação de níveis dos factores usados para os definir. Esses estados ou condições são indexados por 1,2...k...16.

Para cada um desses estados foram feita várias observações (ou réplicas). O estado pode assim ser representado pelo conjunto dessas réplicas, ou pelo seu valor médio. Se usarmos os valores médios, ficamos com 16 vectores (com as correlações entre os espectros medidos nessa condição), que representam as 16 condições.

Ao obter uma representação gráfica simultânea para os estados, podemos elaborar a seguinte questão: o que sucede quando se passa de um estado para outro estado?

Esta questão equivale a comparar os VMV, que correspondem às matrizes de correlação ($R_1, \dots, R_k, \dots, R_{16}$) duas a duas, visto que elas representam os estados. Isto pode ser feito definindo um índice de dissemelhança para matrizes de correlação, que neste caso foi simplesmente a distância Euclidiana entre os vectores VMV.

Obtém-se assim uma matriz simétrica (diagonal zeros) com $16 \times 16 = 256$ valores correspondentes às dissemelhanças entre condições ou estados.

Graficamente:

	$[VMV_{c1}]$...	$[VMV_{ck'}]$...	$[VMV_{c16}]$
$[VMV_{c1}]$	<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 100px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: auto;"> $d(c_k, c_{k'})$ </div>				
...					
$[VMV_{ck}]$					
...					
$[VMV_{c16}]$					

Pode obter-se uma representação geométrica para estes estados realizando um MDS métrico (Multidimensional Scaling) tendo como *input* estes dados que, como se vê comparam directamente os estados ou condições representadas pelas matrizes de correlações, sem usar qualquer referencial cartesiano ou variáveis/atributos do estado, que ficaram representados por uma relação entre estados vibratórios nos pontos de observação. A representação gráfica através de MDS permite preservar as distâncias originais entre objectos embora haja uma distorção introduzida (ou stress) que não é possível eliminar e que pode ser calculada para cada par por,

$$\text{stress} = \sqrt{\frac{(d_{i,j} - \hat{d}_{i,j})^2}{(d_{i,j} - \bar{d})^2}}$$

Onde,

$d_{i,j}$ é a distância verdadeira; \hat{d} é a distância no gráfico 2D; \bar{d} é a média das distâncias.

4 Apresentação de resultados

4.1 Caracterização por níveis de potência

A caracterização mais simples que podemos fazer é considerar simplesmente a potência das vibrações medidas. Isto traduz num único valor, facilmente comparável com as normas, as vibrações da máquina. Por um lado este método ignora muita informação relativa ao espectro e aos pontos onde este é medido. No entanto, o nível global de potência é de facto o parâmetro a que os operadores são mais sensíveis: uma máquina que vibra muito está em pior estado que uma que vibra pouco!

Podemos calcular a potência do espectro (que pelo teorema de Parseval é igual ao valor RMS do sinal no tempo) achando a raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores do espectro:

$$P(x) = \sqrt{\sum_i x(i)^2}$$

Se calcularmos as médias das potências para cada condição obtemos:

Condição	Potência
A (+E)	2.83
I	2.86
D (+F)	3.57
B (+EF)	3.99
AD (+EF)	4.85
AB (+F)	6.51
ABD	14.95
BC	15.22
BCD (+F)	24.64
ABC (+E)	25.95
C (+EF)	28.29
BD (+E)	39.07
CD (+E)	39.22
ACD	40.90
ABCD (+EF)	44.66
AC (+F)	57.92

Ficamos assim com uma boa referência para os níveis de vibrações a esperar para cada tipo de avaria. Ficamos também com uma clara indicação de quais as avarias que provocam maiores níveis de vibração. A título de exemplo, uma avaria do tipo C (desaperto dos apoios do lado da bomba) provocam níveis de vibração significativamente superiores (lado inferior da tabela) que as outras avarias. Também é curioso notar que a avaria do tipo A (desequilíbrio no veio), embora por si só não provoque níveis elevados de vibrações (é praticamente igual à máquina sem avarias -condição I), quando combinada com outra avaria provoca vibrações muito intensas (as três condições mais violentas incluem desequilíbrio do veio).

Embora a grande vantagem desta abordagem seja a indicação da severidade da vibração com apenas um valor, a experiência indica-nos que fenómenos de degradação em rolamentos, que tem frequências de vibração altas e com pouca energia, podem passar despercebidas levando em conta apenas este valor global.

Apresenta-se no anexo 4 o código Matlab desenvolvido.

4.2 Caracterização pela transformada VMV

Após a recolha dos dados foi aplicada a metodologia descrita anteriormente.

Primeiramente os dados das diversas medições foram transferidas do equipamento de medição para uma folha de cálculo (ficheiro dados.xls) onde cada observação corresponde a uma coluna. Seguidamente essa folha de cálculo foi lida pelo sistema Matlab, onde se calculou as transformadas VMV. Nesta situação, e para abreviar o trabalho prático mantendo a demonstração da eficácia do método, usámos apenas 4 pontos de medida distintos para caracterizar cada observação. Ficamos assim com $3 \times 4 / 2 = 6$ coeficientes de correlação, para caracterizar cada situação. Os pontos de medição seleccionados foram os pontos P1, P5, P7, e P8, por nos terem parecido os que melhor caracterizavam a máquina, e que eram mais distantes entre si. Seguidamente usou-se o método de projecção multidimensional, genericamente chamado Multidimensional Scaling (MDS) para projectar os dados num espaço bidimensional. Neste caso usámos o método de Sammon, que está disponível no Somtoolbox para Matlab. Cada observação fica assim representada por um ponto num plano bidimensional. Numa primeira fase, fizemos a caracterização de cada condição, calculan-

do as médias das transformadas VMV para todas as observações de cada condição. Fazendo a projecção desses dados obtemos os resultados apresentados na Figura 17. Nessa vê-se que a situação “normal”, identificada pela letra “I” aparece bem isolada das outras, e numa posição bastante central. Verifica-se também que aquelas onde as vibrações são muito intensas, quer pela avaria introduzida quer pela combinação de factores (caso da condição C, ABCD, ACD, e ABC) estão bastante afastadas, e neste caso estão no canto superior direito.

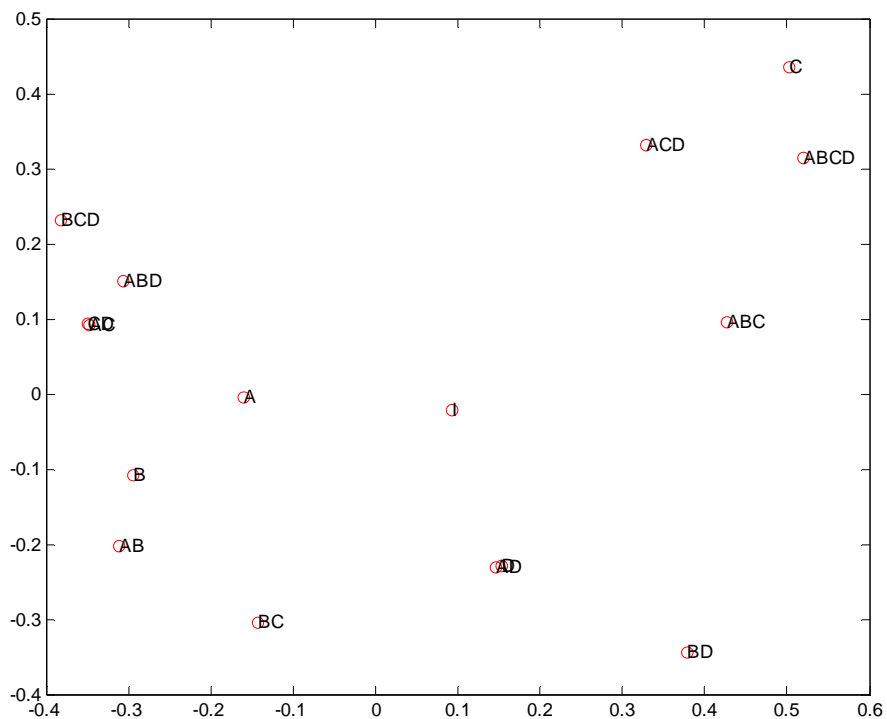


Figura 17- Projecção com MDS das médias das transformadas VMV para cada condição.

Estes resultados parecem muito bons, mas carecem de um estudo mais aprofundado. Para tal, devemos ver onde ficam mapeadas as observações individuais, e confirmar que estas estão mais próximas da média da sua condição do que das outras médias. Fazendo essas projecções, obtemos os resultados apresentados na Figura 18. O stress desta projecção é de 17.6, o que é um valor muito aceitável. Vê-se imediatamente que há uma enorme dispersão para as observações de cada condição. Para obter resultados mais significativos, seria necessário obter muito mais gravações, e fazer validações cruzadas para estimar a taxa de erro na classificação das diversas con-

dições. Tais testes estão fora do âmbito desta dissertação, que pretende apenas mostrar a viabilidade deste método.

Apresenta-se no anexo 3, o código Matlab desenvolvido para o cálculo do exposto anteriormente.

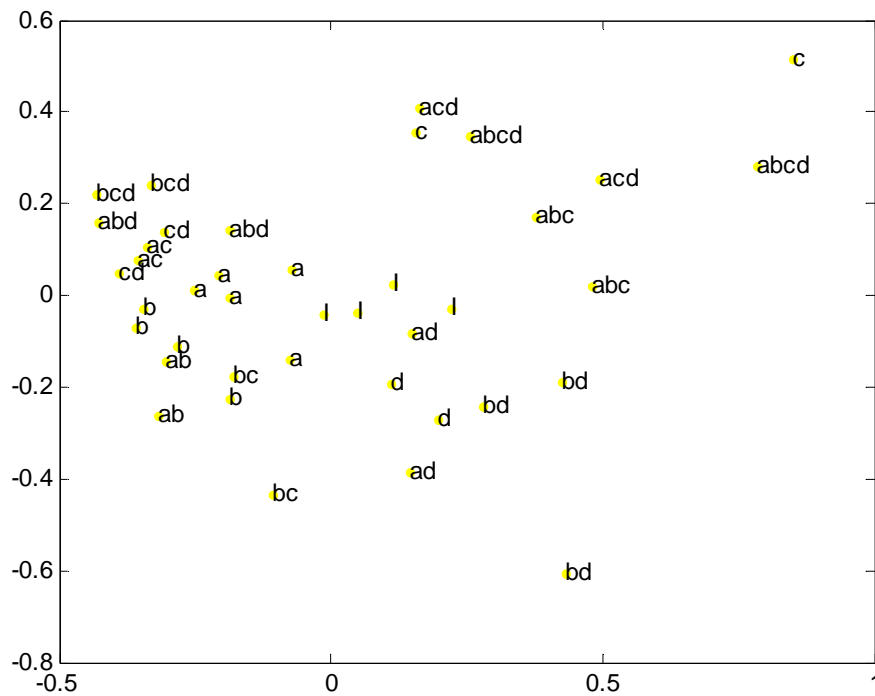


Figura 18 - Projecções por MDS das transformadas VMV das 40 observações realizadas. Cada observação é identificada pela condição em que foi recolhida.

4.2.1 Apresentação dos resultados obtidos com apenas 2 características

Ao usar as projecções no plano bidimensional estamos a introduzir distorções devidas ao método de projecção. Para eliminar esse passo, podemos seleccionar apenas 2 valores dos 6 obtidos pela transformada VMV.

Para escolher quais os coeficientes de correlação (da transformada VMV), calculámos os desvios padrão de cada coeficiente para as médias das diversas condições. Os resultados são apresentados na tabela abaixo.

Pontos de medida	P1-P5	P1-P7	P1-P8	P5-P7	P5-P8	P7-P8
Desvio padrão entre Coeficientes de Correlação de espectros médios por condição.	0.0932	0.1848	0.2078	0.1852	0.2086	0.1032
Desvio padrão entre Coeficientes de Correlação de espectros por observação	0.1260	0.1550	0.2012	0.1739	0.2107	0.1197

Verifica-se que as maiores diferenças ocorrem no coeficiente de correlação entre o espectro no ponto P5 e P8. Essa foi por isso escolhida como a principal característica. Como segunda característica, usamos a correlação entre o ponto P1 e P7 por serem independentes da outra característica e por terem um desvio padrão também elevado. As médias por condição (Figura 19), bem como as observações individuais (Figura 20) parecem-nos melhor discriminadas do que quando usamos MDS com as 6 variáveis. Assim sendo, achamos que este é o melhor método a usar. No entanto, reconhecemos que ainda há muita dispersão entre observações, e que teremos que trabalhar mais este aspecto.

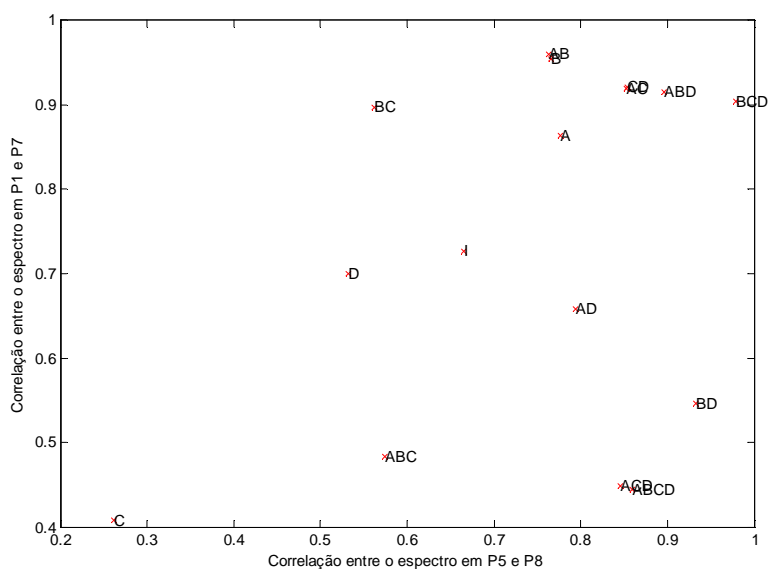


Figura 19 -Caracterização das médias para as condições, através de dois dos coeficientes de correlação.

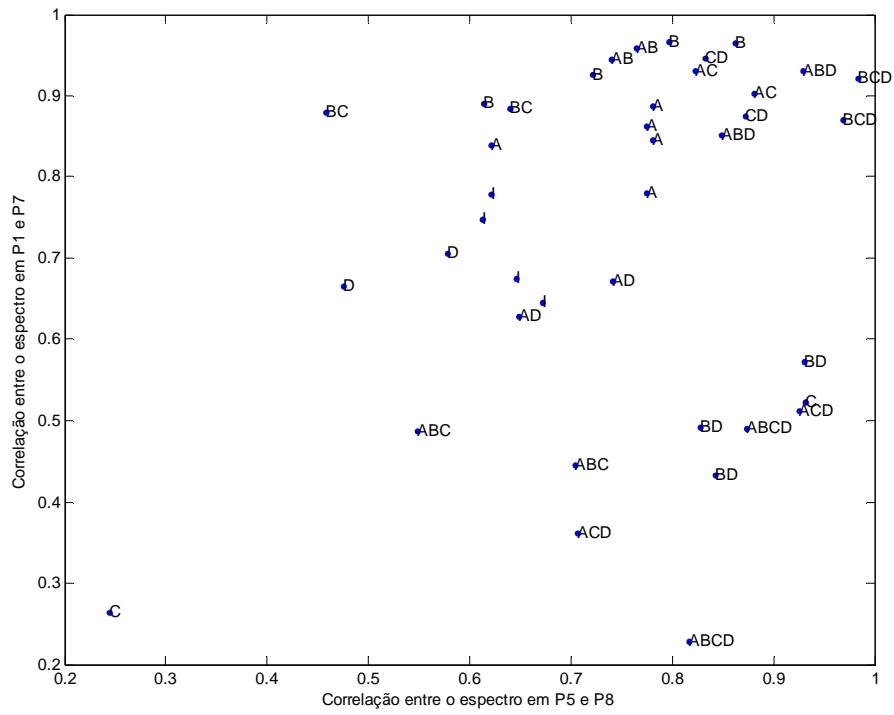


Figura 20 - Caracterização das observações através de dois dos coeficientes de correlação.

5 Trabalho futuro

A aplicação deste método ainda está a dar os seus primeiros passos.

Uma das áreas em que tencionamos melhorar este trabalho é na projecção dos vectores VMV. Vislumbra-se como caminhos a explorar, a utilização de SOM's, Análise em Componentes Principais, e BiPlots, como técnicas de redução da dimensionalidade e de visualização dos dados.

Julga-se de grande interesse a recolha de nova informação sistemática de vibrações na mesma máquina, de modo a poder posicionar as sucessivas medidas futuras nos gráficos obtidos e assim caracterizar a evolução da condição do equipamento.

Com mais dados experimentais, e com novos métodos de redução de dimensionalidade (ou mesmo sem eles) será possível desenhar classificadores que identifiquem automaticamente as condições e avarias a que o equipamento está sujeito.

Por último, será interessante aplicar esta metodologia a um equipamento a funcionar em contexto real.

6 Conclusões

Mostrou-se que uma análise preliminar dos dados através do nível de potencia nos dá uma indicação rápida do estado da máquina, e quais os defeitos que mais contribuem para a severidade da vibração. Esta indicação permite aos operadores do equipamento uma indicação dos defeitos a que devem prestar mais atenção de modo a manter o estado de condição da máquina sempre aceitável.

Com a presente dissertação mostrou-se que o método proposto da transformada de VMV é viável, e que portanto podemos caracterizar o estado de condição de uma máquina através da correlação das medições das vibrações em diversos pontos. Esta caracterização é feita por meio de uma representação geométrica plana, obtida por MDS, em que cada estado fica representado por um único ponto do gráfico. Isto significa que, em estudos futuros, podemos encarar a possibilidade de usar uma representação deste tipo para posicionar, através de pontos, conjuntos de medições de vibração obtidos pela monitorização da máquina, usando as trajectórias assim obtidas ao longo do tempo, como instrumentos de diagnóstico.

Mostrou-se também que é possível analisar dados de vibração sem recorrer ao software específico dos fabricantes de equipamentos, que em muitos casos adopta protocolos e características próprias que inviabilizam qualquer compatibilidade com o software COTS.

Os dados recolhidos durante a investigação constituem um *data set* que pode servir de base a trabalhos futuros.

Bibliografia

- Akturk, M. S. G., Sinan (2007). "Machining conditions-based preventive." International Journal of Production Research **45**(8): 1725-1743.
- Andrade, F. A., I. Esat, M.N.M. Badi (2001). "A New Approach to Time-Domain Vibration Condition Monitoring: Gear Detection and Identification by The Kolmogorov-Smirnov Test." Journal of Sound and Vibration **240**(5): 909-919.
- ATA -Air Transport Association (1993). MSG-3 Maintenance Program Development Document Revision 2,. Washington, D.C.
- Banjevic, D., Jardine, A.K.S.,Makis, V., Ennis, M. (2001). "A control limit policy and software for condition based maintenance optimization." INFOR,(39): 32-50.
- Barata, J., C Guedes Soares , M. Marseguerra, E. Zio (2002). "Simulation modelling of repairable multi-component deteriorating system for "on condition" maintenance optimisation." Reliability Engineering & System Safety **76**: 255-264.
- Bengston, M. (2004). Standardization issues in condition based maintenance. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Vaxjo, Sweden.
- Bengston, M. O., Eric ;Funk,Peter ; Jackson,Mats (2004). Technical Design of Condition Based Maintenance System. Maintenance and Reliability Conference- Proceedings of the 8th Congress, Knoxville, EUA, University of Tennessee- Maintenance and Reliability Center.
- Box, G., Hunter, W , Hunter, J. (1978). Statistics for Experimenters - An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building. New York, Jonh Wiley and Sons.
- Carnero, M. C. (2003). "Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study." Decision Support Systems(38): 539-555.
- Ebersbach, S., Zhongxiao Peng (2006). "Expert system development for vibration analysis in machine condition monitoring." Expert Systems with Applications **34**(2008): 291-299.
- Edwards, D. J., Gary D. Holt , Frank C. Harris (1998). "A model for predicting plant maintenance costs." Construction Mangement and Economics **2000**(18): 65-75.
- Eti, M. C., S.O.T. Ogati, S.D. Probert (2006). "Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture." Journal of Applied Energy **83**(2006): 1235-1248.
- Harris, C. M., Allan G. Piersol (2002). Harris' Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill.
- ILDINAV_802 (2001). Doutrina de Manutenção para os Navios da Armada, Marinha-Direcção de Navios.
- ISO_13306 (2006). Maintenance Terminology, International Stadard Organization.
- ISO_13380 (:2002). Condition monitoring and diagnostics of machine- General guidelines, ISO.
- Jardine, A. K. S., D. Lin, and D. Banjevic, (2005). "A review on Machimery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance." Mechanical Systems and Signal Processing,: 1483-1510.
- Jayaswal, P., A.K.Wadhwani; K.B. Mulchandani (2008). "Machine Fault Signature Analysis." International Journal of Rotating Machinery **2008**: 10 pages.

- Jonhson, P. (1997). "The Status of Maintenance Management in Swedish Manufacturing." Journal of Quality in Maintenance Engineering **3**(4): 233-258.
- Lobo, V., Rui Parreira, Valter Martins Vairinhos, (2008). Detecção e identificação de avarias em motores rotativos usando sensores de baixo custo. Joclad. Setúbal.
- MIL-STD 1843 (1981). Reliability-Centered Maintenance. Washington, D.C., U.S. Department of Defense.
- Mitchell, J. S. (1999). "The history of condition monitoring and condition based maintenance." Sound and vibration Journal **33**(21-28).
- Mobley, K. R. (2004). Maintenance Fundamentals, Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Moubray, J. (1997). Reliability-centered Maintenance. Oxford, UK, Butterworth-Heinemann.
- Nowlan, F. S., Heap, H. F. (1978). Reliability-Centered Maintenance. Washington , DC, Department of Defense report number AD-A066579.
- Pedregal, D. J., M. Carmen Carnero (2005). "State Space Models for Condition Monitoring: a case study." Reliability Engineering & System Safety **91**: 171-180.
- Pereira, Z. L., Requeijo, J. G. (2008). Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos. Caparica, Fundação da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e Prefácio-Edição de Livros.
- Santos, J. L. d. (2009). Relação Cliente/Prestadores de serviços de manutenção. 10º Congresso Nacional de Manutenção. Figueira da Foz, Associação Portuguesa de Manutenção Industrial.
- Scheffer, C., Paresh Girdar (2004). Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance, Elsevier.
- Silva , C. W. d. (2005). Vibration and Shock Handbook, Taylor & Francis.
- Smith, A. M. (1993). Reliability-Centered Maintenance. New York, NY, McGraw-Hill.
- Souris, J. P. (1992). Manutenção Industrial- Custo ou Benefício? Lisboa, Lidel.
- Vairinhos, V. M., Ribeiro Parreira, Víctor Lobo (2009). Metodologia Estatística Para Análise de Vibrações. I Workshop de vibrações. Escola Naval -Alfeite.
- Vairinhos, V. M., Victor Lobo (2006). MECPAB- Um projecto de monitorização do estado de condição e predicção de avarias de bordo. X Jornadas de Construção Naval , IST. Lisboa.
- Wang, W. (2000). "A model to determine the optimal critical level and the monitoring intervals in condition-based maintenance." International Journal of Production Research(38): 1425-1436.
- Williams, J. H., Alan Davies, Paul R. Drake. (1994). Condition-based Machine Diagnostics. London, Chapman & Hall.
- Zhan, Y., V. Makis, A.K.S. Jardine (2003). "Adaptative Model for Vibration Monitoring of Rotating Machinery subject to random deterioration." Journal of Quality in Maintenance Engineering **9**(4): 351-375.