

# IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLO DE CONDIÇÃO (Metodologia de Apoio à Decisão)

Siopa, J.P., Silva, J.M.<sup>a</sup>

\*Prof. Catedrático, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico

## RESUMO

*Neste trabalho apresenta-se uma metodologia de apoio à decisão de implementação de um processo de controlo de condição a um conjunto de equipamentos, dentro de uma estratégia de maximização de recursos. Esta metodologia permite avaliar o impacto de um processo de controlo de condição no custo do ciclo de vida dos equipamentos, sendo possível integrar na mesma análise, o estudo dos vários níveis de estruturação do sistema.*

## 1 - INTRODUÇÃO

Este trabalho foi suscitado pela participação do Instituto Superior Técnico no projecto SEM XXI - Sistema Integrado de Exploração e Manutenção (apoiado pelo PEDIP), que teve como elemento de estudo o Veículo da frota do Metropolitano da cidade do Porto.

A definição de um sistema de Controlo de Condição, engloba a escolha dos equipamentos, das técnicas de controlo de condição aplicáveis e dos parâmetros indicativos do estado de degradação dos equipamentos. O objectivo destes procedimentos é recolher toda a informação que contribua para o melhor conhecimento e controlo dos diversos mecanismos de falha de um sistema. Por esta razão, estes estudos têm de ser efectuados integrando a generalidade das operações de manutenção. A aplicabilidade do controlo de condição é aferida pela redução do custo do ciclo de vida (LCC) do sistema, directamente resultante da sua implementação. Esta diminuição de custo resulta dos seguintes factores :

### i) Aumento da fiabilidade

O aumento da fiabilidade resulta directamente de um melhor controlo dos mecanismos de falha, os quais passam a ter mais parâmetros de referência para além do tempo de utilização. Em paralelo, a severidade das falhas também diminui.

### ii) Diminuição da manutenção preventiva sistemática

Pode diminuir-se a frequência da manutenção preventiva porque se aumenta a eficiência das operações de manutenção. Dado que se passam a conhecer os "alarmes" característicos das ocorrências de falhas, possibilita que só se efectuem as tarefas de manutenção quando os parâmetros de condição indicam que estas são necessárias. São ainda minimizadas as consequências de reparações mal efectuadas.

### iii) Aumento da disponibilidade

A disponibilidade aumenta directamente com a fiabilidade e com a diminuição da manutenção. Além disso é possível planear melhor as operações de

manutenção correctiva, efectuado-as quando é mais oportuno e de forma mais eficiente.

#### **iv) Aumento do rendimento**

O equipamento mantém-se operacional durante mais tempo e é mantido mais próximo das condições ideais de funcionamento.

## **2 - PROCEDIMENTO**

### **2.1 Selecção dos Equipamentos**

Com os dados da estruturação e da análise de modos de falha, é possível identificar os equipamentos que podem ser seguidos pelo sistema de controlo de condição e quais as técnicas específicas que se podem aplicar a cada um.

Numa primeira fase, é necessário efectuar um levantamento de todos os equipamento onde é tecnicamente proveitoso, possível ou aconselhável a recolha de parâmetros de condição.

De seguida deve realizar-se uma análise de custos, na qual se pretende avaliar, de forma isolada, a aplicabilidade de cada uma das técnicas de controlo de condição aos equipamentos previamente seleccionados.

Finalmente é conveniente avaliar a compatibilidade da aplicação ao equipamento do conjunto de técnicas seleccionadas, para as quais as análises técnica e económica foram favoráveis. A complementaridade entre duas ou mais técnicas, pode ser avaliada recorrendo às respectivas propriedades na detecção dos modos de falha do equipamento. Desta forma, aplicam-se em simultâneo as técnicas que se completam, eliminando as que sejam redundantes.

### **2.2 Recolha de Dados**

Cada um dos equipamentos seguidos por controlo de condição, considerando a aplicação de uma ou várias técnicas específicas, fornece sempre um conjunto de parâmetros cuja relação com os mecanismos de falha nem sempre está definida ou mesmo garantida à partida. No

entanto, cada tipo de equipamento tem sempre um conjunto de características conhecidas. Deste modo, o comportamento dos parâmetros de condição pode ser comparado, e de certa forma previsto, com resultados registados em equipamentos semelhantes.

A necessidade de se construir um histórico de avarias e parâmetros de condição, por forma a avaliar a correlação destes valores, é intransponível. Estabelece-se ainda, como regra, que na fase inicial sejam seguidos o máximo de parâmetros disponíveis, para progressivamente se irem eliminando os elementos não relevantes.

### **2.3 Modos de Falha Detectáveis**

Um sistema de controlo de condição detecta normalmente as alterações das condições de funcionamento de um equipamento. Estas modificações podem resultar das condições de carga, do meio ambiente ou do aparecimento de mecanismos de falha. A detecção de ambos os fenómenos é igualmente relevante para os serviços de manutenção, porque qualquer destas alterações pode modificar de forma significativa as probabilidades de avaria de um equipamento.

As funções de um sistema de controlo de condição são:

- i)** detectar todas as situações de funcionamento deficiente, por mais pequenas que sejam;
- ii)** facilitar a determinação das causas da avaria;
- iii)** permitir estabelecer a gravidade da falha em cada caso.

Numa primeira fase pode ser conveniente seguir de forma mais apertada a evolução de algumas das falhas detectadas, permitindo que se recolha maior quantidade de informação necessária para estabelecer mais cedo qual a melhor forma de actuar perante cada situação.

### **2.4 Parâmetros de Condição**

Cada inspecção de controlo de condição fornece normalmente um grande conjunto

de valores candidatos a parâmetros de condição ou seja, do estado de degradação de cada equipamento. Numa primeira fase pode não se conseguir (ou até nunca ser possível) verificar quais as relações de dependência entre aqueles valores, nem qual a correlação dos mesmos com a probabilidade de falha do equipamento.

Assim, os dados das primeiras inspecções são sistematicamente analisados, de modo a que se possa ir estabelecendo a relação destes dados com a degradação do equipamento. Com o aumento da experiência em cada tipo de equipamento podem determinar-se os critérios de decisão das acções de manutenção condicionada e eliminar progressivamente a recolha de dados não relevantes.

### 2.5 Planos de inspecção

O estabelecimento do plano de manutenção é normalmente da responsabilidade do fabricante do equipamento, estando muitas vezes o operador obrigado a segui-lo criteriosamente durante o período de garantia. No entanto, o operador deve ajustar os respectivos planos de manutenção às suas condições específicas de exploração e manutenção. Se o operador tiver possibilidades de dar um passo em frente, realizando a sua própria avaliação das necessidades de manutenção do equipamento, fica em condições de poder questionar as opções do fabricante ao nível dos planos de manutenção e/ou mesmo ao nível dos requisitos de projecto.

O objectivo final do estabelecimento de planos de manutenção por parte do operador, reside na obtenção do conhecimento das implicações de cada uma das estratégias de manutenção aplicáveis a cada equipamento. Este conhecimento permite ajustar progressivamente o modelo de manutenção às condições de exploração e estabelecer novos requisitos de projecto que possibilitem um melhor desempenho do equipamento.

Quando se pretende implementar um modelo de manutenção baseado num sistema de controlo de condição, a um

equipamento para o qual o fabricante só especifica um plano de manutenção temporal, é inevitável que este plano tenha de ser completamente rectificado pelo operador. Como consequência, é necessário verificar se o novo plano de manutenção contempla as condições impostas pelo fabricante para o período de garantia do equipamento. Caso contrário é fundamental modificá-lo de forma a verificar as condições, ou obter o acordo do fabricante, ou ainda assumir as consequências da quebra da garantia.

### 2.6 Estratégias de Manutenção

Cada uma das estratégias de manutenção associadas a um equipamento tem em princípio características diferentes de fiabilidade, de manutenção e de inspecção de controlo de condição. No entanto, na fase de projecto apenas se distinguem as diversas estratégias pelas frequências de inspecção, da manutenção preventiva e de ocorrência de falhas não detectadas. Assim, a cada frequência de inspecção estão associadas uma periodicidade de manutenção e uma percentagem de falhas catastróficas.

## 3 - MÉTODOS DE DECISÃO

O método desenvolvido permite efectuar a avaliação comparativa do interesse em seguir cada um dos equipamentos por um sistema de controlo de condição (Fig. 1).

O primeiro critério de decisão que justifica a implementação do controlo de condição, é a diminuição do custo do ciclo de vida do equipamento. Paralelamente podem ser considerados ainda a obtenção de elevados valores de fiabilidade e disponibilidade.

Numa primeira fase ou sempre que não existam dados relevantes, só se podem efectuar estimativas para o desempenho do controlo de condição a implementar. À medida que se vão obtendo dados concretos do sistema em análise, vão sendo substituídas as estimativas pelos valores obtidos ao longo da exploração do equipamento. Efectuando novas avaliações

procede-se às alterações que se verifique serem recomendáveis.

A metodologia a seguir pode aplicar-se a diferentes níveis da estrutura de um equipamento. Quando se pretende analisar a decisão de implementar um sistema de controlo de condição, em mais de um nível de estruturação, os valores dos níveis superiores devem ser calculados a partir do nível mais baixo, por forma a que se tenha uma maior precisão.

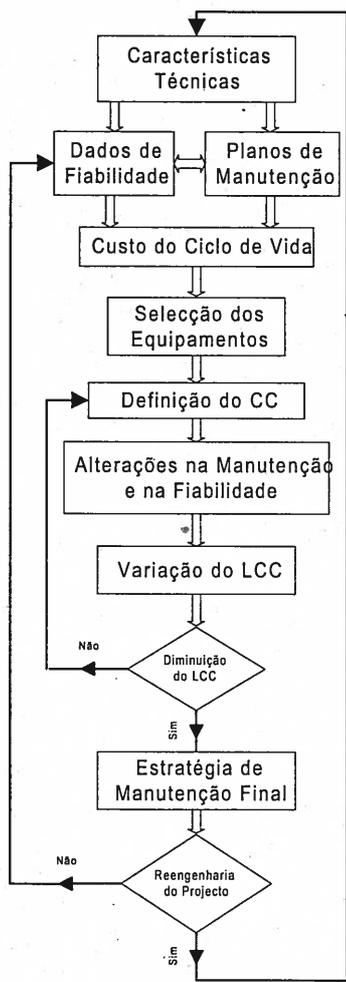


Fig. 1 – Esquema da Metodologia apresentada

Esta metodologia recorre a algumas simplificações por forma a tentar reduzir a algoritmos muito simples o processo de avaliação de problemas complexos como é a avaliação do desempenho de um sistema de controlo de condição. Apesar destas simplificações, considera-se que este método é bastante flexível e robusto, permitindo que só se mostre relativamente inadequado para uma ínfima parte dos casos.

Como boa prática recomenda-se que quando se aplica esta metodologia a um nível superior, sejam considerados todos os dados disponíveis para os níveis inferiores. Mesmo quando se parte do nível de componente, normalmente o mais baixo, podem obter-se alguns dados recorrendo aos valores apresentados para cada um dos modos de falha e/ou reparação do equipamentos.

Quando existe uma grande incerteza nas primeiras estimativas considera-se conveniente adoptar a avaliação e implementação de diferentes estratégias de manutenção, dentro de um conjunto de equipamentos semelhantes, por forma a ganhar rapidamente a sensibilidade de qual a melhor maneira de seguir cada uma das falhas.

### 3.1 Dados Requeridos

Os dados necessários para o cálculo dos parâmetros de decisão são os apresentados de seguida e podem dividir-se em seis grupos:

#### i) Dados do conjunto

$N_c$  - Quantidade de tipos de elemento diferentes do nível inferior.

$Q_{ti}$  - Quantidade de elementos do tipo "i" no nível inferior.

#### ii) Ciclo de vida

$LT$  - Tempo de vida : intervalo de tempo para o qual se faz a análise.

$AC$  - Custo de aquisição : entende-se como o custo de aquisição do 1º equipamento a desempenhar a função.

#### iii) Falhas e Reparações

$MTBF$  - Tempo médio entre avarias .

$MTTR$  - Duração média das reparações.

$MTTCR$  - Duração média das reparações de falhas catastróficas (falhas críticas ocorridas em serviço).

$RC$  - Custo de reparação.

$\%CF$  - Percentagem de falhas catastróficas : considera-se a % de falhas que são simultaneamente críticas e que ocorrem em serviço.

$CFC$  - Custo de falha catastrófica : valor médio dos custos directos e indirectos.

#### iv) Manutenção preventiva

$MTBM$  - Tempo médio entre intervenções de manutenção.

$MTTM$  - Duração média das intervenções de manutenção.

$MC$  - Custo das intervenções de manutenção.

### v) Inspeção de controlo de condição

*MTBI* - Tempo médio entre inspeções de controlo de condição.

*MTTI* - Duração média das inspeções.

*IC* - Custo médio das inspeções.

### vi) Impacto do controlo de condição

*MTBM*<sup>®</sup> - Tempo médio entre intervenções de manutenção (c/ controlo de condição).

*%CF*<sup>®</sup> - Percentagem de falhas catastróficas (c/ controlo de condição).

## 3.2 Pressupostos e simplificações

Pretendendo-se uma metodologia de cálculo relativamente simples, admitem-se os seguintes pressupostos e simplificações:

i) O custo de ciclo de vida de um sistema pode ser dividido pelo custo de cada um dos elementos que o constituem.

ii) Ao longo do ciclo de vida todos os custos são divididos por custos de aquisição, de reparação, de manutenção preventiva e de inspeção por controlo de condição.

iii) O custo de fim de vida (abate, reutilização, reciclagem) de cada um dos equipamentos a substituir e o custo de aquisição do substituto entram como custos de manutenção preventiva, se esta operação for programada, ou como custos de reparação, se esta resultar da ocorrência de uma falha.

iv) Todos os custos directos e indirectos das falhas entram como custos de reparação.

v) Os custos fixos das instalações são criteriosamente distribuídos pelos custos das operações de reparação, manutenção preventiva e de controlo de condição.

vi) De todas as implicações que o controlo de condição tem nos dados de manutenção, restringimos para a fase de previsão, a análise da alteração de dois parâmetros, o *MTBM* e o *%CF*.

## 3.3 Transferência de Dados

Para conseguir saber as propriedades de um conjunto de elementos (normalmente o conjunto de elementos constitui um elemento no nível superior de uma estruturação de um sistema), é necessário conhecer as propriedades de cada um dos

*N<sub>c</sub>* tipos de elementos diferentes e quantidade de elementos de cada tipo *Q<sub>ti</sub>* no conjunto.

As equações que permitem o cálculo das propriedades de um conjunto de elementos são as seguintes:

$$AC_S = \sum_{i=1}^{N_c} Q_{t_i} \times AC_C \quad (1)$$

$$MTBF_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i}}{MTBF_i} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$MTTR_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i} \times (1 - \%CF_i) \times MTTR_i}{MTBF_i} \right) \times \frac{MTBF_S}{1 - \%CF_S} \quad (3)$$

$$MTTCR_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i} \times \%CF_i \times MTTCR_i}{MTBF_i} \right) \times \frac{MTBF_S}{\%CF_S} \quad (4)$$

$$RC_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i} \times (1 - \%CF_i) \times RC_i}{MTBF_i} \right) \times \frac{MTBF_S}{1 - \%CF_S} \quad (5)$$

$$\%CF_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i} \times \%CF_i}{MTBF_i} \right) \times MTBF_S \quad (6)$$

$$CFC_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i} \times \%CF_i \times CFC_i}{MTBF_i} \right) \times \frac{MTBF_S}{\%CF_S} \quad (7)$$

$$MTBM_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i}}{MTBM_i} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$MTTM_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i} \times MTTM_i}{MTBM_i} \right) \times MTBM_S \quad (9)$$

$$MC_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i} \times MC_i}{MTBM_i} \right) \times MTBM_S \quad (10)$$

$$MTBI_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i}}{MTBI_i} \right)^{-1} \quad (11)$$

$$MTTI_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i} \times MTTI_i}{MTBI_i} \right) \times MTBI_S \quad (12)$$

$$IC_S = \left( \sum_{i=1}^{N_c} \frac{Q_{t_i} \times IC_i}{MTBI_i} \right) \times MTBI_S \quad (13)$$

**Nota 1:** Quando equipamentos iguais estão sujeitos a condições de funcionamento distintas e/ou se prevê a aplicação de múltiplos esquemas de manutenção nestes elementos é necessário dividir o grupo. Para que cada agrupamento seja constituído somente por elementos iguais e sujeitos a condições de exploração semelhantes.

### 3.4 Cálculo dos Parâmetros de Decisão

Os parâmetros de decisão são:

$\Delta LCC$  - Variação do custo do ciclo de vida (c/ controlo de condição)

$\Delta TLDT$  - Variação do tempo indisponível no tempo de vida (c/ controlo de condição)

A obtenção dos valores para os dois parâmetros de decisão  $\Delta LCC$  e  $\Delta TLDT$ , envolve o processo de cálculo que se apresenta de seguida.

#### i) Falhas e Reparações

$TLRT$  - Tempo total das reparações no tempo de vida.

$$TLRT_c = \frac{LT_c [MITR_c (1 - \%CF_c) + MITCR_c \times \%CF_c]}{MTBF_c} \quad (14)$$

$$\frac{\Delta TLRT_c}{TLRT_c} = \left( \frac{MITR_c^\circ \times (1 - \%CF_c^\circ) + MITCR_c^\circ \times \%CF_c^\circ}{MITR_c \times (1 - \%CF_c) + MITCR_c \times \%CF_c} - 1 \right) \quad (15)$$

$TLRC$  - Custo total das reparações no tempo de vida

$$TLRC_c = \frac{LT_c \times [RC_c \times (1 - \%CF_c) + CFC_c \times \%CF_c]}{MTBF_c} \quad (16)$$

$$\Delta TLRC_c = TLRC_c \left( \frac{RC_c (1 - \%CF_c^\circ) + CFC_c \times \%CF_c^\circ}{RC_c (1 - \%CF_c) + CFC_c \times \%CF_c} - 1 \right) \quad (17)$$

#### ii) Manutenção Preventiva

$TLMT$  - Tempo total das intervenções de manutenção no tempo de vida

$$TLMT_c = \frac{LT_c \times MTTM_c}{MTBM_c} \quad (18)$$

$$\Delta TLMT_c = TLMT_c \left( \frac{MTBM_c - MTBM_c^\circ}{MTBM_c^\circ} \right) \quad (19)$$

$TLMC$  - Custo total das intervenções de manutenção no tempo de vida

$$TLMC_c = \frac{LT_c \times MC_c}{MTBF_c} \quad (20)$$

$$\Delta TLMC_c = TLMC_c \left( \frac{MTBM_c - MTBM_c^\circ}{MTBM_c^\circ} \right) \quad (21)$$

#### iii) Inspeção de controlo de condição

$TLIT$  - Tempo total das inspeções no tempo de vida

$$TLIT_c = \frac{LT_c \times MTTI_c}{MTBI_c} \quad (22)$$

$TLIC$  - Custo total das inspeções no tempo de vida

$$TLIC_c = \frac{LT_c \times IC_c}{MTBF_c} \quad (23)$$

#### iv) Custo do Ciclo de vida (facultativo)

$LCC$  - Custo do Ciclo de Vida

$$LCC_c = AC_c + TLRC_c + TLMC_c \quad (24)$$

$TLDT$  - Tempo total indisponível no tempo de vida

$$TLDT_c = TLRT_c + TLMT_c \quad (25)$$

$LCC/LT$  - Custo de funcionamento por hora

#### v) Impacto do Controlo de Condição (parâmetros de decisão)

$$\Delta LCC_c = \Delta TLRC_c + \Delta TLMC_c + TLIC_c \quad (26)$$

$$\Delta TLDT_c = \Delta TLRT_c + \Delta TLMT_c + TLIT_c \quad (27)$$

### 3.5 Análise dos Resultados

Os parâmetros de decisão são o custo e a respectiva duração (de todas as falhas, intervenções de manutenção e inspecções) ao longo do tempo de vida útil do sistema em análise.

Considerando-se a diminuição do custo do ciclo de vida do equipamento o factor decisivo, a duração das operações de manutenção pode utilizar-se como um parâmetro auxiliar, que deve ser analisado quando é requerida uma elevada disponibilidade a um determinado equipamento e as tarefas de manutenção se estendem pelo período em que é necessário o seu funcionamento.

Em suma, o cerne da questão da aplicabilidade do Controlo de Condição, está em saber se o custo (e/ou o tempo) das inspecções de controlo de condição são recuperados pela diminuição da severidade das falhas e/ou pelo maior espaçamento entre intervenções de manutenção preventiva.

Os valores dos parâmetros de decisão de implementação do Controlo de Condição obtidos conduzem ao seguinte conjunto de situações.

$\Delta LCC < 0 \wedge \Delta TLDT < 0$  (Diminuição do custo e do tempo indisponível)

Neste caso o controlo de condição é sempre vantajoso.

$\Delta LCC < 0 \wedge \Delta TLDT > 0$  (Diminuição do custo e aumento do tempo indisponível)

Nesta situação o controlo de condição deve ser aplicado se o equipamento puder ser inspecionado fora das horas de serviço. Caso estas inspecções tenham

implicações no período de funcionamento é necessário estabelecer um custo, *NFHC - Custo médio por hora de indisponibilidade do equipamento*. Se for verificado que a diminuição do custo de ciclo de vida é superior ao custo da indisponibilidade, o controlo de condição deve ser aplicado.

Para esta situação, a aplicação do controlo de condição deve ser efectuada se e só se :

$$-ALCC \geq \Delta TLDL \times NFHC \quad (28)$$

$\Delta LCC > 0 \wedge \Delta TLDL < 0$  (Aumento do custo e diminuição do tempo indisponível). Para este caso o controlo de condição não deve ser aplicado. Contudo, se o equipamento tiver problemas de indisponibilidade, isto é, se algumas das intervenções de manutenção são efectuadas nas horas de serviço, causando diminuições no período de funcionamento, é necessário estabelecer um custo, *NFHC - Custo médio por hora de indisponibilidade do equipamento*. Se for verificado que a aumento do custo é inferior ao valor do aumento de disponibilidade, o controlo de condição deve ser aplicado.

Para esta situação, a aplicação do controlo de condição deve ser efectuada se e só se :

$$\Delta LCC \leq -\Delta TLDL \times NFHC \quad (29)$$

$\Delta LCC > 0 \wedge \Delta TLDL > 0$  (Aumento do custo e aumento do tempo indisponível)

Neste caso o controlo de condição não deve ser implementado.

#### 4 - APLICAÇÃO

Como exemplo de aplicação da metodologia apresentada, considera-se o desenvolvimento do Plano de Inspeções de Controlo de Condição por Análise de Vibrações, para os elementos do sistema pneumático de um Veículo do Metropolitano da cidade do Porto.

Neste sistema, os equipamentos a analisar são o compressor, o ventilador e os respectivos motores.

#### 4.1 Valores do sistema

Por razões de preservação da confidencialidade, os dados utilizados neste exemplo ilustrativo não são os do sistema real. Este facto deve ser tido em conta na interpretação das considerações aqui apresentadas.

Os dados de ciclo de vida do sistema são calculados pela Eq.(1) a partir dos valores dos equipamentos. Os dados de fiabilidade, manutenção preventiva e de inspecção de controlo de condição para cada equipamento, são obtidos dos respectivos modos de falha, operações de manutenção e inspecção, através das Eq.s (2) a (13).

Como ilustração dos cálculos, apresentam-se somente os dados (de modos de falha, das acções de manutenção preventiva e das inspecções de controlo de condição), com que são obtidos os valores para o Motor 1.

##### i) Ciclo de vida

Nc=4	Descrição	LT (h)	AC (\$)
Qt.	Pneumático	100 000 000	900
1	Motor 1	100 000 000	200
1	Motor 2	100 000 000	80
1	Compressor	100 000 000	500
1	Ventilador	100 000 000	120

Em geral existe toda a conveniência em fazer coincidir as inspecções de controlo de condição com as acções de manutenção preventiva, uma vez que se poupam grande parte dos tempos de acesso. Neste exemplo admite-se que as inspecções são sempre realizadas quando os equipamentos estão em manutenção na oficina. Assim, grande parte das acções de manutenção são efectuadas em simultâneo. Os valores do custo (e duração) das operações de periodicidade superior só devem contemplar

## ii) Falhas & Reparações

Descrição		Dados de Fiabilidade e Modos de Falha								Cálculos Parciais						
Nc	Equipamento	MTBF	%CF		MTTR	RC		MTTRC	CFC	TLRT		TLRC				
Qt	Modo de Falha	horas	%		horas	\$		horas	\$	Horas		\$				
5	Motor 1	500.000	23%	16%	1,5	1,5	82	82	2,6	2,5	202	198	349	335	21.850	20.152
1	Rolamentos	769.231	20%	15%	1,5		80		2,5		200		221	214	13.520	12.740
1	Estator-Motor	3.333.333	30%	15%	2,0		100		3,0		220		69	65	4.080	3.540
1	Rotor-Motor	5.000.000	30%	15%	2,0		100		3,0		220		46	43	2.720	2.360
1	Caixa de Ligação	10.000.000	40%	40%	0,5		50		1,5		160		9	9	940	940
1	Outros	10.000.000	10%	8%	0,3		50		1,3		140		4	4	590	572
5	Motor 2	500.000	32%	21%	1,0	1,1	58	59	1,6	1,6	104	101	245	233	14.605	13.576
8	Compressor	208.333	21%	20%	1,1	1,1	109	110	2,1	2,1	259	255	618	609	67.651	66.392
2	Ventilador	2.500.000	34%	12%	0,6	0,6	61	62	1,2	1,3	124	125	33	28	3.288	2.768

## iii) Manutenção preventiva

Descrição		Dados de Manutenção Preventiva					Cálculos Parciais				
Nc	Equipamento	MTBM	MTTM		MC	TLMT		TLMC			
Qt	Acção Manutenção	horas	horas		\$	horas		\$			
2	Motor 1	5.926	6.667	5,3	5,3	107	107	90.000	80.000	1.800.000	1.600.000
1	Subs. Rolamentos	8.889	10.000	4,0		80		45.000	40.000	900.000	800.000
1	Revisão Geral	17.778	20.000	8,0		160		45.000	40.000	900.000	800.000
2	Motor 2	5.926	6.667	5,3	5,3	80	80	90.000	80.000	1.350.000	1.200.000
4	Compressor	441	580	1,4	1,5	26	29	309.000	250.500	5.947.500	5.007.500
1	Ventilador	17.778	20.000	1,0	1,0	100	100	5.625	5.000	562.500	500.000

## iv) Inspeção de controlo de condição

Descrição		Inspeção A. Vibrações			Cálculos Parciais	
Nc	Equipamento	MTBI	MTTI	IC	TLIT	TLIC
Qt	Acção de Inspeção	horas	horas	\$	horas	\$
3	Motor 1	8.889	0,10	12	1.125	135.000
0	Análise simples	4.444	0,05	7	1.125	157.500
1	Análise detalhada	8.889	0,10	12	1.125	135.000
0	Análise exaustiva	17.778	0,20	40	1.125	225.000
2	Motor 2	17.778	0,20	35	1.125	196.875
2	Compressor	8.889	0,25	40	2.813	450.000
1	Ventilador	17.778	0,15	30	844	168.750

o acréscimo de tarefas em relação às operações mais frequentes.

Deste modo os valores da periodicidade das operações (MTBM e MTBI), que sejam efectuadas em simultâneo perdem o significado físico, representando apenas um valor estatístico quando são transferidas para os níveis superiores,

segundo as Eq.s (8) e (11). Fisicamente medir 10 grandezas de 10 em 10 km é diferente de medir 1 de 1 em 1 km, mas estatisticamente são iguais.

## 4.2 Análise dos Custos e Tempos de Manutenção

Os valores dos custos e tempos de manutenção para o caso em estudo são:

Qt	Descrição	LCC	ΔLCC	TLDT	ΔTLDT	LCC/LT	NFHC	Decisão
		\$	\$	Horas	horas	\$/h	\$/hora	
4	Pneumático (parte)	9.768.294	-406.382	495.870	-73.258	0,098	0	Aplicar
1	Motor 1	1.822.050	-66.698	90.349	-8.889	0,018	0	Aplicar
1	Motor 2	1.364.685	45.846	90.245	-8.887	0,014	0	Não
1	Compressor	6.015.651	-491.260	309.618	-55.696	0,060	0	Aplicar
1	Ventilador	565.908	105.730	5.658	214	0,006	0	Não

Na figura 2 representam-se graficamente os valores dos custos de exploração.

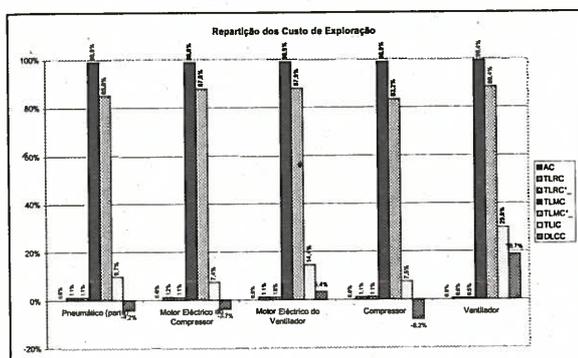


Fig 2 – Repartição dos valores dos custos de exploração

Na figura 3 apresenta-se um gráfico com os valores dos tempos de manutenção.

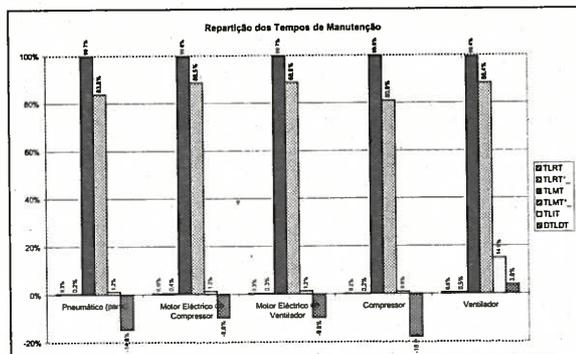


Fig 3 – Repartição dos tempos de manutenção

#### 4.2 Análise dos Resultados

Uma conclusão geral que podemos tirar é que o custos de todos os equipamentos estão muito desequilibrados, uma vez que os custos associados à manutenção preventiva representam mais de 99.4% e os associados às falhas menos de 0.6%.

O motivo deste desequilíbrio, deve-se ao facto de por cada operação de reparação correctiva serem realizadas mais de 100 operações preventivas, sendo que os custos com as falhas e os custos de reparação apresentam a mesma ordem de grandeza. Esta característica verifica-se em sistemas que apresentam como requisito uma fiabilidade elevada.

O peso relativo de cada equipamento face ao conjunto do sistema pneumático, apresenta-se na figura 4.

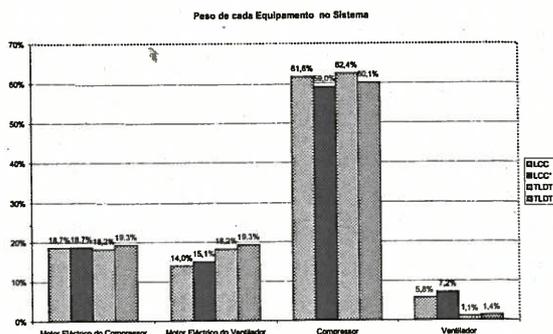


Fig 4 – Peso de cada equipamento no sistema

Este exemplo da aplicação da metodologia desenvolvida, permite concluir que a implementação de um sistema de controlo de condição, neste caso, só trás benefícios se conseguir levar à diminuição do peso da manutenção preventiva, dado que em termos globais, a alteração na taxa de falhas dos equipamentos é insignificante.

As diferença entre equipamentos são mínimas; ao motor do ventilador só não é benéfico aplicar o controlo de condição porque o custo unitário de inspecção é relativamente alto. No caso do ventilador verifica-se que o custo do controlo de condição é semelhante aos demais equipamentos, mas o custo e o tempo de manutenção preventiva são muito inferiores, logo o que se poupa em manutenção preventiva não compensa os gastos de inspecção.

#### 5 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia cujo objectivo é fundamentar a decisão de implementação de um processo de controlo de condição a um sistema constituído por diversos equipamentos.

Sendo que a decisão de implementação de um processo de controlo de condição é justificada se o custo e/ou o tempo das inspecções de controlo de condição são recuperados pela diminuição da severidade das falhas e/ou pela menor frequência das intervenções de manutenção preventiva.

A metodologia exposta apresenta toda a formulação que permite o cálculo destes

custos utilizando dados estatísticos conhecidos para os equipamentos do sistema. Efectuados os cálculos a decisão a tomar é justificada através da análise dos parâmetros  $\Delta LCC$  e  $\Delta TLDL$ .

Apesar de todas as hipóteses simplificativas que se consideraram, os cálculos envolvidos podem assumir alguma complexidade, como se pode verificar pelo pequeno exemplo apresentado. No exemplo apresentado apenas analisámos um sistema, com 4 equipamento, 20 modos de falha, 9 acções de manutenção preventiva e 5 inspecções, mesmo assim existe já alguma complexidade.

Esta dificuldade na análise resulta da grande dependência entre todos os dados de manutenção e cujas principais causas são :

- a influência de cada inspecção de controlo de condição pode ser completamente diferente para cada modo de falha de cada equipamento;
- a diminuição da manutenção preventiva tem de ser analisada para cada acção de manutenção de cada equipamento;
- as alterações na periodicidade das acções de manutenção têm consequências nos níveis mais elevados, normalmente uma revisão geral envolve todos elementos do sistema ou da máquina;
- as acções de manutenção, as inspecções de controlo de condição e a fiabilidade dos equipamentos estão relacionadas entre si e dependentes de outros equipamentos no mesmo sistema.

O carácter inovador do método desenvolvido resulta directamente do estabelecimento de relações de dependência entre todos os dados da manutenção. O método torna possível o estudo integrado de um sistema completo, calculando as implicações globais, a partir da influência deste nos modos de falha e operações de manutenção preventiva de cada componente.

## 6 - AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar os seus agradecimentos aos membros do consórcio que realizou o projecto SEM XXI, apoiado pelo PEDIP, em particular às empresas Bombardier Transportation e MIIT, pela colaboração sempre prestada que permitiu a realização deste trabalho.

## 7 - REFERÊNCIAS

- Andrews, J.D. and Moss, T.R. , *Reliability and Risk Assessment*, Longman Scientific & Technical, 1993.
- Gershenson, J. and Kosuke, I., *Life-Cycle Serviceability Design*, Design Theory and Methodology, ASME, DE-Vol. 31 Pag. 127-134, 1991.
- Latino, Kenneth C., *Failure Modes & Effects Analysis " A Modified Approach"*, Maintenance Conference NPRA – National Petroleum Refineries Association, May 1996.
- Jardine, A. K. S., *Maintenance, Replacement and Reliability*, Pitman Publishing, 1998.
- Moubray, John, *Reliability Centred Maintenance*, Butterworth-Heinemann, 1991.