

Análise de Condição em Turbinas a Gás – Aplicação de Cartas de Controlo Short Run Especiais

Suzana Lampreia, Valter Vairinhos & Victor Lobo

Centro de Investigação Naval (CINAV) - Portuguese Naval Academy, Portugal

Email: suzana.paula.lampreia@marinha.pt

valter.vairinhos@sapo.pt

vlobo@novaims.unl.pt

José Requeijo

Faculty of Science and Technology of the Universidade Nova of Lisbon, Mechanical and Industrial Engineering Department

jfgr@fct.unl.pt

Teresa Morgado

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Instituto Politécnico de Tomar e UNIDEMI da FCT-UNL

tmorgado@ipt.pt

Resumo

Os parâmetros de funcionamento de uma turbina são vitais para o controlo da sua condição. No presente artigo é proposto que os parâmetros de funcionamento das Turbinas de um navio tenham um método de tratamento estatístico, cujos seus valores sejam tratados através de cartas de controlo. Para isso vão ser aplicadas as cartas de controlo ShortRun especiais CUSUMQ e EWMAW Modificadas, designadas por CUSUMQM e EWMAQM, utilizadas para amostras pequenas. Com a aplicação das cartas de controlo pretende-se detetar numa fase preliminar a tendência para o agravamento das vibrações na turbina e consequentemente a tendência para a avaria. Desta forma pretende-se um controlo de condição efetivo da máquina, permitindo gerir a sua utilização de acordo com a sua condição, gerando maiores fatores segurança material e do pessoal.

Palavras Chave: Manutenção Condicionada, Cartas Controlo CUSUMQ Modificadas, Cartas Controlo EWMAQ Modificadas, Turbinas a Gás.

1. Introdução

Um navio com deslocamento superior a 3000 toneladas e com propulsão CODOG em que as turbinas propulsoras funcionam pouco tempo e em situações específicas, pode traduzir-se num desafio quando se efetua o seu controlo de condição. Os escassos períodos de funcionamento e os vários arranques a que são sujeitas estas máquinas provocam um desgaste e envelhecimento precoce dos componentes. Com esta degradação acelerada é imperativo que o seu funcionamento seja monitorizado de forma contínua.

Os parâmetros de funcionamento (ex: temperaturas, pressões e vibrações) são recolhidos através de um sistema de monitorização dos dados Automático. O equipamento é acompanhado através de um método de visualização empírico e os parâmetros de funcionamento recolhidos não são tratados de modo estatístico, embora existam resultados comprovados da possível recolha e tratamento dos dados através de métodos estatísticos (Parreira *et al.*, 2006). Sendo o equipamento acompanhado desta forma, propõe-se um método de tratamento de dados que possa modelar o comportamento da máquina.

A abordagem de Dias *et al.* (2009) mostra uma aplicação de controlo de condição em equipamentos utilizando cartas EWMA (Estimated Weighted Moving Average) e CUSUM (Cumulative Sum). As cartas de controlo são ainda aplicadas na evolução dos parâmetros físico-químicos e espectrómetros do óleo, o que poderá servir de indicador de potenciais falhas do sistema.

Não obstante outras metodologias, as políticas de manutenção condicionada a adotar devem conduzir a uma maior disponibilidade e performance, com um custo mínimo, para isso testou-se a aplicação das cartas de controlo modificadas para amostras pequenas (Short Run) nos dados de funcionamento seleccionados.

De referir que por razões de enquadramento da temática e comparação de resultados, vai-se primeiramente abordar as cartas de controlo univariadas para pequenas amostras e depois as CUSUMQ e as EWMAQ.

2. Cartas de controlo

2.1 Cartas de Controlo QM

Face à escassez de dados, em alguns processos não é possível estimar os parâmetros média e desvio padrão de forma fidedigna. Nestes casos a metodologia de *Charles Quesenberry* é aplicada. Como não se pode controlar a média da variável de X (que é uma variável contínua), esta é transformada em Q . A característica Q no instante r é:

$$Q_r(X_r) = \Phi^{-1} \left(G_{r-2} \left(\sqrt{\frac{r-1}{r}} \left(\frac{X_r - (T_L)_{r-1}}{S_{r-1}} \right) \right) \right), \quad r = 4, 5, \dots \quad (1)$$

Nesta carta existe apenas uma fase, o respetivo gráfico é construído com os pontos $(r, Q_r(X_r))$, onde $Q(X)$ é a carta de controlo. Esta carta permite o controlo da média para $r=4$. A diferença para a carta de Quenseberry de controlo de processo é que o valor de \bar{X}_{r-1} é substituído por $(T_L)_{r-1}$ que representa o limite definido pelo fabricante ou pelas normas internacionais. De referir que se estivermos a considerar uma variável cujo limite seja um máximo, como é o caso das vibrações, somente os valores de Q superiores ou iguais a zero são considerados, (Quesenberry, 1996).

A média e a variância no instante r é:

$$\bar{X}_r = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r X_j \quad (2)$$

$$S_r^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (X_j - \bar{X}_r)^2 \quad (3)$$

A média e a variância da amostra no instante r (\bar{X}_r e S_r^2), podem ser calculados em função de X_r e em função dos valores nos instantes anteriores ($r-1$) (Snoussi, 2006).

Nas equações acima, as variáveis representadas são (Pereira & Requeijo, 2012):

X_r - Observação no instante r .

$(T_L)_{r-1}$ - Limite de vibração considerando $(T_L)_r = (T_L)_N - 3\sigma_{r-1}$ para a observação número $(r-1)$, onde $(T_L)_N$ é o limite de vibração da norma.

S_{r-1} - Desvio padrão de $(r-1)$.

$\Phi^{-1}(\bullet)$ - Inverso da Função de Distribuição Normal.

$G_\nu(\bullet)$ - Distribuição de T-student em função de ν graus de liberdade.

Tendo as variáveis $Q(X)$ uma distribuição $N(0,1)$, considerando somente os máximos, os limites de controlo das cartas são iguais ou superiores a zero, e são dados por:

$$LSC_Q = 3 \quad (4)$$

$$LC_Q = 0 \quad (5)$$

$$LIC_Q = -3 \quad (6)$$

A análise da carta Q_X modificada difere da análise da carta $Q(X)$, uma vez que as regras definidas em ISO8258:1991 não são aplicadas no presente estudo.

2.2 Carta CUSUMQ Modificada

No âmbito do presente estudo podemos utilizar as cartas CUSUMQ Modificadas (CUSUMQM), que normalmente são mais sensíveis. Para estas também se considera que os dados são independentes, e que têm $Q \sim N(0;1)$. A estatística Q é determinada de acordo com a equação 1.

Para as cartas CUSUMQM, com as estatísticas T e C Lampreia et al (2012):

$$T_i = \min(0, T_{i-1} + (Q_i + k)) \quad (7)$$

$$C_i = \max(0, C_{i-1} + (Q_i - k)) \quad (8)$$

A determinação de LA e LSC obtém-se em função do valor de ARL (*Average Run Length*) e do valor de referência k , com o auxílio de ábacos desenvolvidos por Gan (1991) para as duas situações (Pereira & Requeijo, 2012).

2.3 Carta EWMAQ Modificada

As estatísticas Q para a carta EWMAQ Modificada (EWMAQM) são determinadas da mesma forma que nas cartas Q . Para a carta EWMAQM, a variável exponencialmente amortecida, E , é dada por (Lampreia *et al*, 2013):

$$E_t = \max \left(0, (1 - \lambda) E_{t-1} + \lambda (\bar{Q}_t - T_L) \right), \quad 0 < \lambda < 1 \quad (9)$$

Em que, $\sigma_{\bar{X}} = \sigma_{\varepsilon} / \sqrt{n}$, $\Delta = \delta \sigma_{\bar{X}}$, $T_L = (T_L)_{Norma} - \Delta_s$ e $\Delta_s = \delta_1 \sigma$, sendo δ_1 uma constante.

Os limites de aviso e superior de controlo para esta carta são dados pelas equações (10) e (11).

$$LA_E = K_1 \sigma_E \quad (10)$$

$$LSC_E = K_2 \sigma_E \quad (11)$$

Em que

$$\sigma_E = \sigma_{\bar{X}} \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda}} \quad (12)$$

A variável Q segue uma distribuição Normal reduzida ($\mu_Q = 0$, $\sigma_{Q^2} = 0$ e $E_0 = \mu_Q = 0$). Onde λ é a constante de amortecimento e K é o limite de controlo. Para definir λ e K deve ser usado o procedimento de Crowder, utilizando os ábacos existentes (Crowder, 1989).

As cartas *short run* são aplicadas em vários tipos de processos, nomeadamente no controlo de processos de manufatura industrial e no período do seu arranque, em que são calculados os parâmetros do processo (Lampreia, 2013). No entanto à medida que os dados se acumulam, outras cartas são mais aconselháveis e podem vir a substituir as primeiras.

2.4 Cartas de Controlo Short Run – Metodologia

A metodologia proposta para aplicação das cartas $QM/CUSUMQ/EWMAQ$ na monitorização de parâmetros de funcionamento de equipamentos reparáveis é conforme se segue:

1. Recolher dados de funcionamento dos pontos definidos para registo de dados.

2. Construir uma das cartas *QM/CUSUMQ/EWMAQ* baseada nos dados recolhidos considerando que os dados são independentes.
3. Estimar a média, e a variância dos parâmetros de funcionamento do equipamento para cada instante.
4. A monitorização dos parâmetros de funcionamento do equipamento faz-se da seguinte forma:
 - O *LSC* é 3 e o nível de alerta é definido por 2.5.
 - Os níveis admissíveis dos parâmetros são definidos pelo fabricante.
 - As regras para atuar no equipamento utilizando as cartas *QM* são:
 - Efetuar uma ação de investigação se existirem 5 pontos consecutivos acima de *LA*.
 - Proceder a uma ação de manutenção se existirem 2 pontos consecutivos acima do *LSC*.
 - Antes de proceder à operação de investigação/manutenção analisar o espectro de frequências de forma a diagnosticar o tipo de avaria.
5. Comparar os resultados obtidos para cada carta de controlo, reavaliar a sua aplicação.

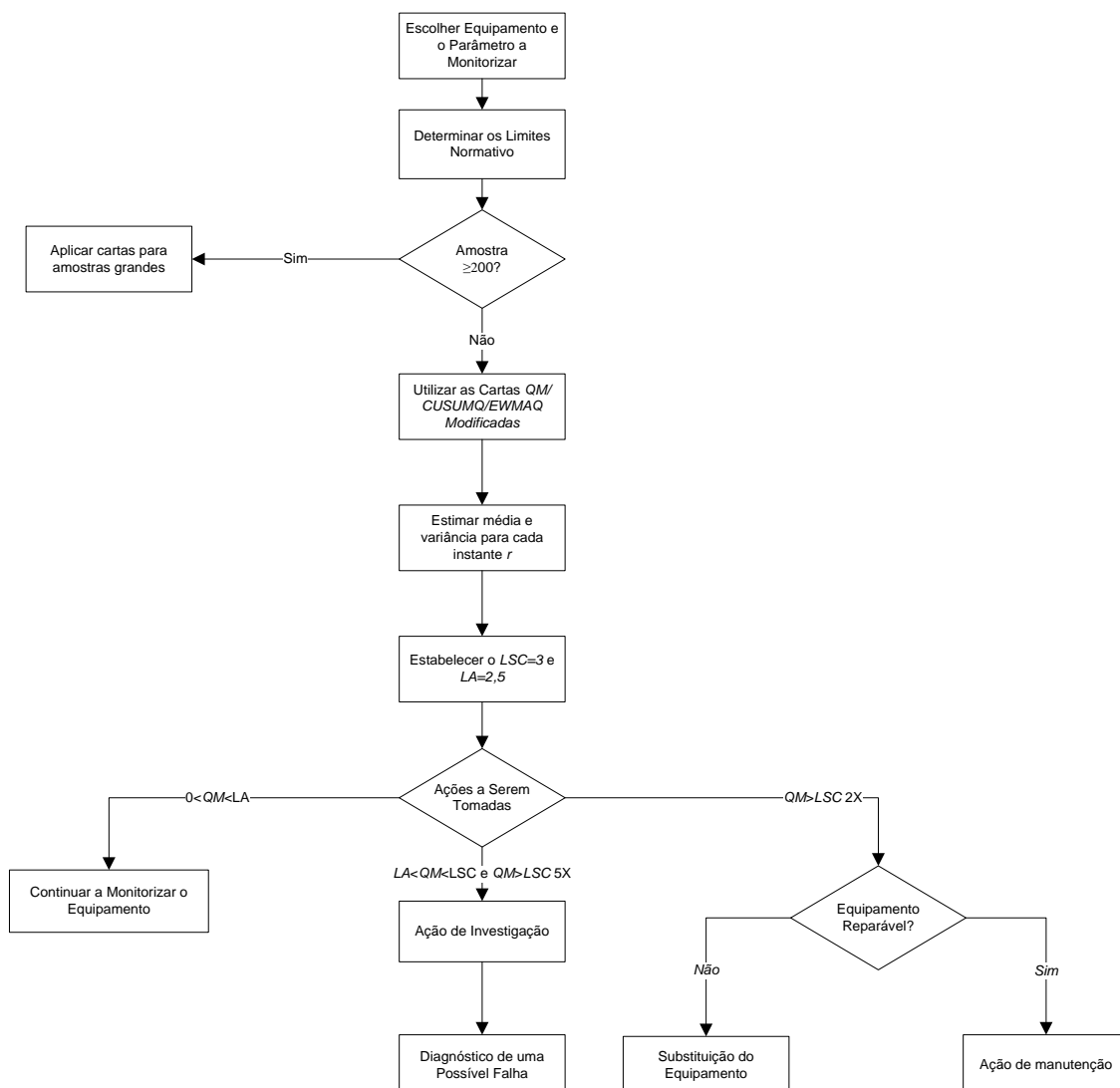


Figura 1 - Metodologia de aplicação da carta de controlo *QM/CUSUMQ/EWMAQ*

3. Caso de Estudo

3.1 Equipamento em Estudo - Turbinas a Gás

Os equipamentos em estudo são turbinas LM2500 e fazem parte do sistema propulsor de um navio. As suas características são as seguintes:

- Turbina aero-derivada, da marca General Electric, versão 7LM2500-SA-MLG/G17;
- É do tipo “split-shaft”, com ligação termodinâmica
- Rendimento térmico: 37%
- Potência máxima: 19.575 Kw (30,420 CV)
- Velocidade de saída: 3600 rpm
- Consumo específico: 168 gr/cv.h (máx. pot.)
- Temperatura de evacuação: 530°C
- Peso: 4676 kg
- Dimensões: 21345mm x 2134 mm x 6629mm

A TG LM2500, Fig. 2, é constituída por dois grandes conjuntos, o Gerador de Gases (GG) e a Turbina de Potência (TP);

O Gerador de Gases é formado pelo compressor, câmara de combustão (CC) e pela turbina de alta pressão (TAP).

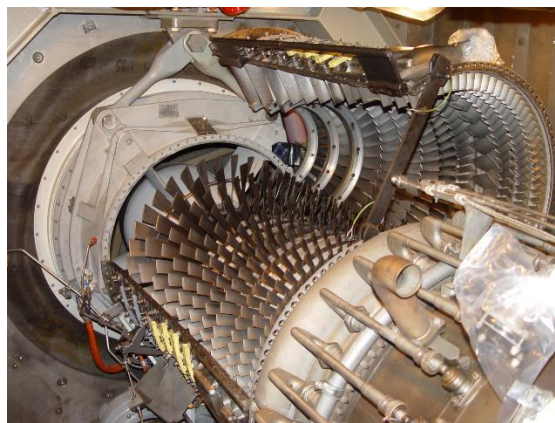


Figura 2 - Turbina LM2500

Para o presente estudo vamos ter em consideração quatro variáveis, que representam o nível global de vibração, recolhido pelos transdutores da turbina. Podem considerara-se as vibrações próprias da turbina (Compressor ou Turbina de Potência) e as induzidas constituídas pela vibração que é induzida pela outra parte da turbina (Compressor ou Turbina Potência).

Tabela 1 - Variáveis a considerar

Nome Sensor	Definição
SNV0374	GT1 GG VIB XDUCER TF1(GG SELF)
SNV0375	GT1 GG VIB XDUCER TF2 (PT IND)
SNV0376	GT1 PT VIB XDUCER TF1 (GG IND)
SNV0377	GT1 PT VIB XDUCER TF2 (PT SELF)

De referir que, no gerador de gases, os limites de funcionamento são conforme se segue: aos 4 mils é dado alarme e aos 7mils a turbina passa a emergência parado. Para o caso da turbina de potência, aos 7 mils é dado o alarme e aos 10 mils a turbina passa a emergência parado. De notar que outras variáveis da turbina podem ser testadas.

3.2 Aplicação das Cartas Controlo QM

Verificou-se que aos dados reais recolhidos nos vários sensores, a metodologia desenvolvida para as cartas *Short Run*, é passível de ser aplicada a este tipo de máquinas. De referir que o número de amostras considerado para cada um dos sensores foi de 50, considerando o compressor a 8000 rpm.

O resultado da aplicação da carta Q tradicional univariada modificada ao sensor SNV0474 da TG2, está constante na Fig. 3. De acordo com o definido, havendo duas observações consecutivas acima do *LSC*, o sistema deverá ter uma intervenção de manutenção, o que se verifica nas observações 24, de 30 a 33, de 36 a 39 e de 44 a 48. De referir que as observações 33, 39 e 48, satisfazem igualmente a condição de inspeção, mas o fato de a manutenção estar também manifestada, o processo de investigação integra o de manutenção. Apesar do estado real da turbina não aconteceu nenhuma anomalia grave porque o respetivo funcionamento foi limitado em potência e em tempo de operação, daí não haver agravamento na leitura gráfica.

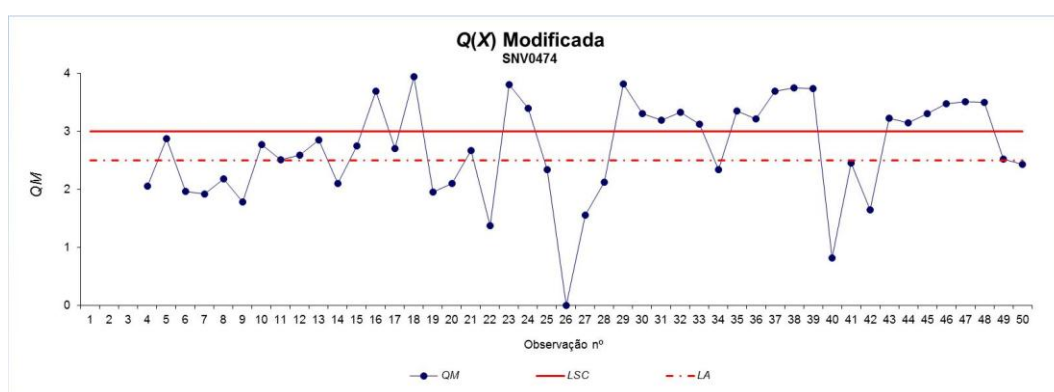


Figura 3 - Carta QM para sensor SNV0474

Para o sensor SNV0475 verifica-se apenas um registo na fase inicial. Pelo que não existe o manifesto de anomalia por parte da turbina, dado que este sensor representa a indução de vibrações da turbina de potência no compressor (Figura 4).

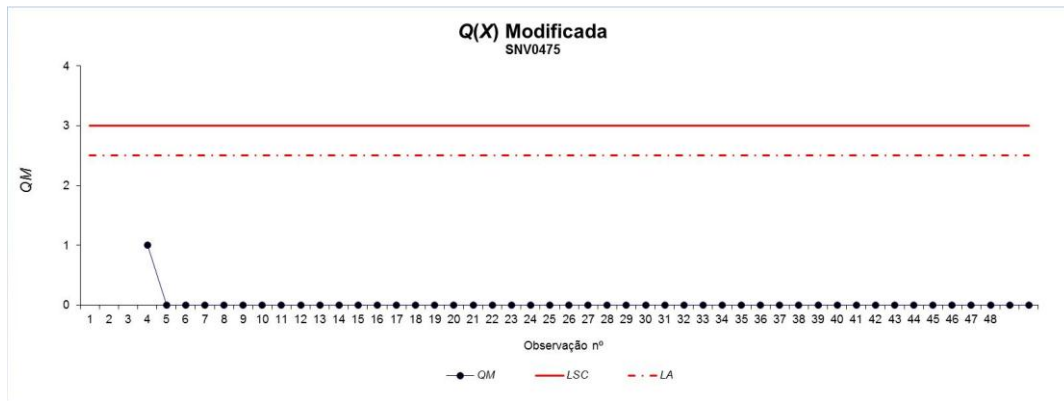


Figura 1 - Carta QM para sensor SNV0475

No caso do sensor SNV0476 verificam-se registros, pois estes representam as vibrações que o gerador de gases induz na turbina de potência. Dado que apenas existe uma observação acima do LSC , não há necessidade de intervenção.

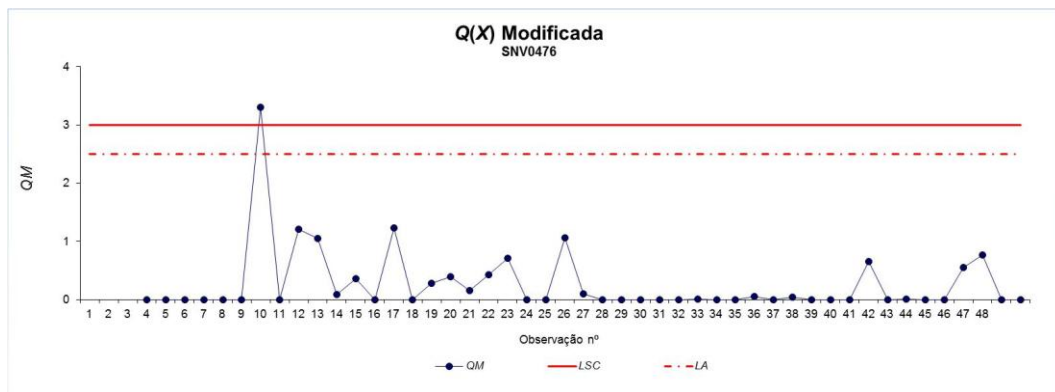


Figura 2 - Carta QM para sensor SNV0476

Para o sensor SNV0477 não existe qualquer registro, pelo que representa o fato de não existir nenhuma anomalia na turbina de potência, o que vai de encontro à situação real que se registou nesta turbina aquando da recolha dos dados, desequilíbrio no compressor estando a turbina de alta pressão e a de potência em bom estado.

3.3 Aplicação da Carta Controlo $CUSUMQM$

Com base nos resultados obtidos para a carta QM e uma vez que os dados utilizados são os mesmos, vamos somente demonstrar a aplicação das cartas $CUSUMQM$ para os sensores SNV0474 e SNV0476.

Foram considerados $\alpha = 1\%$ ($ARL = 100$) na definição de LA e $\alpha = 0,2\%$ ($ARL = 500$)

Tabela 2 - Valor dos limites para vários K para a carta $CUSUMQM$

			$k=\delta/2$			
			0,25	0,5	0,75	1
ARL	500	LSC ($\alpha=0,2\%$)/h	8,5	5,1	3,5	2,7
	100	LA ($\alpha=1\%$)/h1	5,51	3,5	2,5	1,8

Para determinação dos valores dos limites da carta $CUSUMQM$ foi considerada a Tabela 2, onde apenas foram acrescentados dois valores para observação o $k=0,25$ e $k=0,75$. A Figura 6 regista necessidade de proceder a uma intervenção de manutenção desde a observação 9.

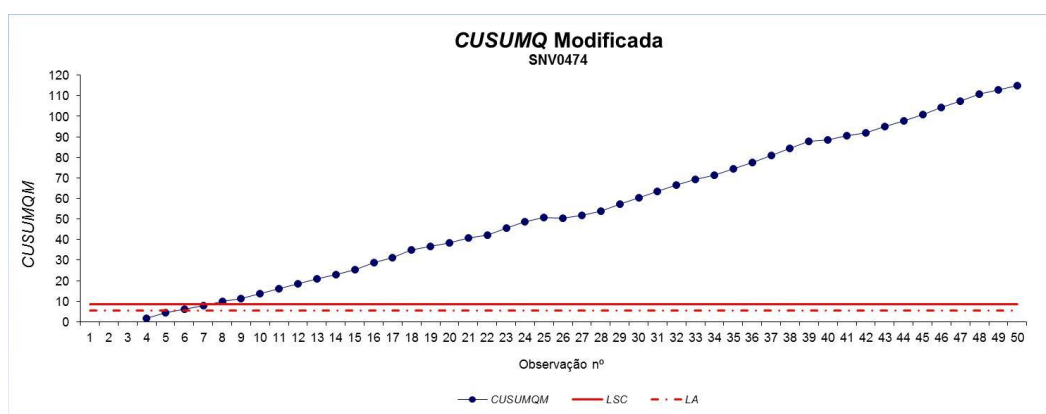


Figura 6 - Carta $CUSUMQM$ para sensor SNV0474 para $k=0,25$

Na Figura 7, para o sensor SNV0476, considerou-se um $k=0,25$, que será o utilizado para as cartas $CUSUMQM$ aplicadas a equipamentos, pois os outros k registaram menor sensibilidade.

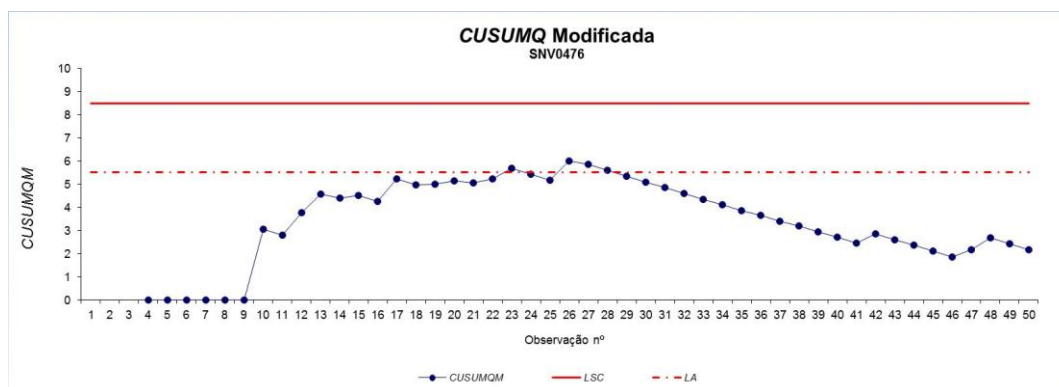


Figura 7 - Carta $CUSUMQM$ para sensor SNV0476 com $k=0,25$

Face os resultados obtidos para estas cartas efetuaram-se testes de ajuste de forma a criar adequabilidade, através de aplicação de base logarítmica, mas ainda carecem de testes de validação.

3.4 Aplicação Carta Controlo EWMAQM a Turbinas a Gás

Para a aplicação das cartas EWMAQM foram utilizados os valores de λ e K de acordo com a tabela 3.

Tabela 3 - Valor dos limites para valores de λ e K para a carta EWMAQM

		δ					
		0,5	1	1,5	0,5	1	1,5
λ		0,05	0,13	0,25	0,08	0,18	0,34
K		2,7	2,9	3	2,1	2,3	2,5
ARL=500 (LSC)				ARL=100 (LA)			

Somente se representa os sensores SNV0474 e SNV0476 pertencentes à TG2 devido ao interesse dos resultados. Na TG1 registaram-se valores, mas não se registou avaria.

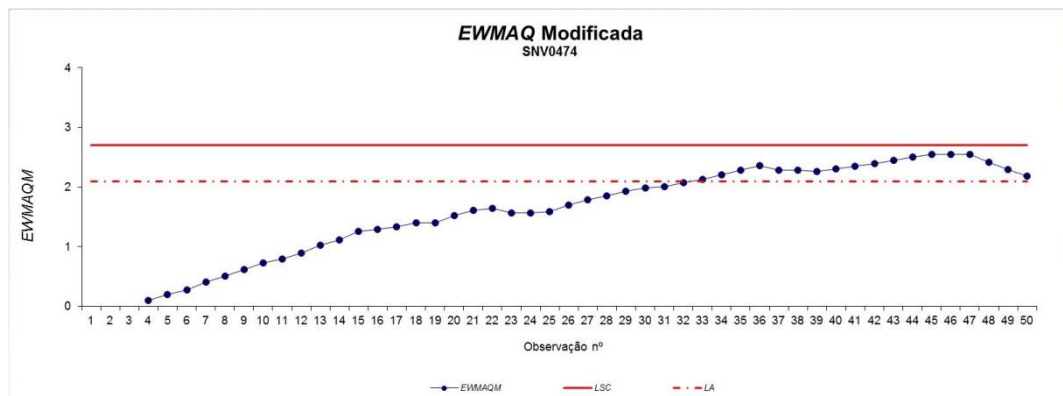


Figura 8 - Carta EWMAQM para sensor SNV0474 com $\lambda=0,05$

Na Fig. 8 regista-se a necessidade de intervenção de inspeção a partir da observação nr 37.

Na figura 9, verifica-se que a sensibilidade da carta EWMAQM aumenta e a partir da observação nr 30 existe necessidade de intervenção de inspeção e na observação nr 35 necessidade de intervenção de manutenção.

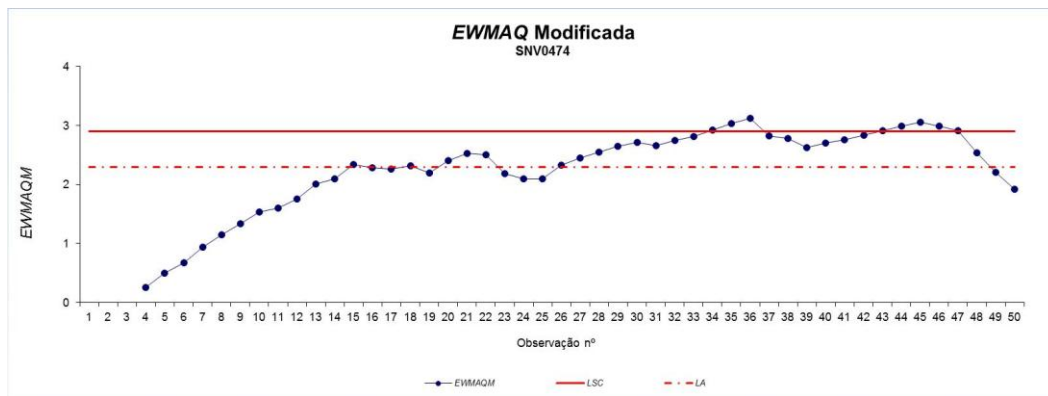


Figura 9 - Carta *EWMAQ* para sensor SNV0474 com $\lambda=0,13$

A carta *EWMAQ* varia em função de λ , atingindo a maior sensibilidade para $\lambda=0,25$. A carta mostra (Figura 10) desde a observação 17 a 18, 5 observações consecutivas acima do *LA*, que de acordo com as regras definidas, implicam uma intervenção de investigação.

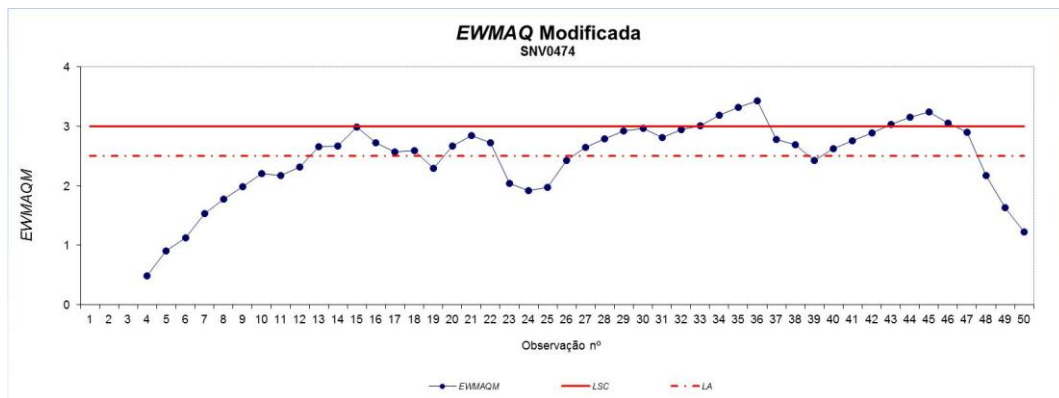


Figura 10 - Carta *EWMAQ* para sensor SNV0474 com $\lambda=0,25$

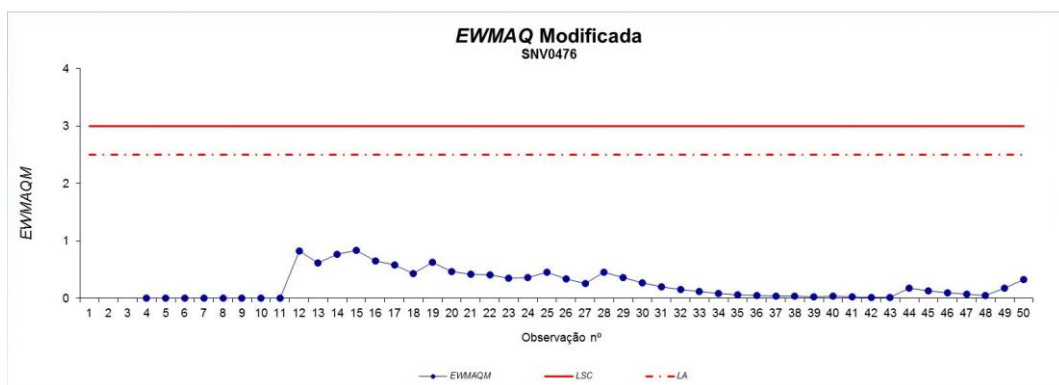


Figura 11 - Carta *EWMAQ* para sensor SNV0476 com $\lambda=0,25$

Relativamente às cartas *EWMAQ*, poder-se-ia se perspetivar um resultado semelhante ao obtido com a *CUSUMQ*, mas tal não se verifica.

Considera-se que o resultado obtido para as cartas *EWMAQM* é mais consistente do que para as cartas *Q*, sendo coerente com a realidade do equipamento.

4 Conclusões

Durante o estudo sobre a monitorização de uma das turbinas a gás, os parâmetros encontravam-se fora controlo estatístico. Nos instantes em que foram efetuados registos a turbina possuía uma avaria, um desequilíbrio no compressor.

Pretendeu-se com a metodologia aplicada verificar e confirmar que esta era adequada para detetar avarias na turbina. Foi verificado através da aplicação de cartas de controlo Short Run que a monitorização é possível a partir da 3ª observação.

Com a aplicação da carta *QM*, é possível efetuar o controlo de funcionamento de turbinas a gás. A carta *QM* é regista uma sensibilidade aceitável dado o estado em que a turbina se encontrava nos instantes correspondentes à recolha dos dados.

A carta de controlo *EWMAQM* revela uma sensibilidade inferior à carta *CUSUMQM* inicialmente desenvolvida. No entanto, considera-se mais adequada a aplicação da carta *EWMAQM* face a consistência dos resultados.

A carta *CUSUMQM* carece de um estudo mais profundo de forma ser adequável ao controlo de condição deste tipo de equipamento.

Considera-se adequada a aplicação das cartas de controlo *Short Run QM* e *EWMAQM* à monitorização deste tipo de turbinas a gás. Acredita-se que com este tipo de metodologias poderá ser possível melhorar a deteção de tendência para avaria dos equipamentos.

Bibliografia

- Crowder, S. (1989). "A simple method for studying run length distributions of Exponentially Weighted Moving Average", *Technometrics*, Vol. 29, pp. 155-162.
- Dias, J.M., Requeijo, J.G. & Pereira, Z.L (2009), Monitorização do Estado de Condição dos Sistemas Reparáveis, em Riscos Industriais e Emergentes, Volume 1, C. Guedes Soares, A. P. Teixeira e P Antão (Eds), Edições Salamandra, Lisboa, 2009 (ISBN: 978-972-689-233-5), pp. 501-511.
- Gan, F. F. (1991). "An optimal design of *CUSUM* quality control charts", *Journal of Quality Technology*, Vol. 23, pp. 279-286.

- Lampreia S., Requeijo J., Dias J. and Vairinhos V. M. (2012). Acompanhamento de Condição de Motores Diesel Marítimos Baseados em Cartas de Controlo Q, CUSUMQ, EWMAQ e MQ. pp. 28-38, O Propulsor, nº 251 nov-dez2012, Lisboa.
- Lampreia S., Dias J. Requeijo J., e Vairinhos V. M. (2013). Gestão da Manutenção e Monitorização de Vibração de Turbinas a Gás com Cartas Q, MQ, EWMAQ e CUSUMQ, MEWMAQ, MCUSUMQ. 17.º Congresso Ibero-americano de Manutenção. 12.º Congresso Nacional de Manutenção. Cascais.
- Lampreia, Suzana (2013). Manutenção Baseada no Estado de Condição. Uma Abordagem Utilizando Cartas de Controlo Modificadas. Tese Doutoramento, FCT-UNL, Monte da Caparica - Almada.
- Quesenberry, C. (1996). "Response to short-run statistical process control m", Quality and Reliability Engineering International, Vol. 12, pp. 159-161.
- Parreira, Rui, Lobo, Vitor e Vairinhos, Valter (2006), Análise de parâmetros de operação de máquinas marítimas, Escola Naval.
- Pereira, Z. L., & Requeijo, J. G. (2012). Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos, Lisboa: Co-edição da Fundação da FCT/UNL e da Editora Prefácio.
- Randall, R. B. (2011). Vibration-Based Condition Monitoring - Industrial, Aerospace and Automotive Applications. United Kingdom: John Wiley and Sons.
- Requeijo, J.G. (2003). Técnicas Avançadas do Controlo Estatístico do Processo, FCT-UNL, Monte da Caparica - Almada.
- Snoussi, A., Ghourabi, M., & Limam, M. (2006). *On SPC for Short Run Autocorrelated Data*, Taylor & Francis, England.
- Zou, CL, 2010, Likelihood Ratio-Based Distribution-Free EWMA Control Charts, Journal of Quality Technology.