



**Suzana Paula Gomes Fernando da Silva Lampreia**  
Mestre em Engenharia Industrial

***Manutenção Baseada no Estado de Condição. Uma  
Abordagem Utilizando Cartas de Controlo  
Modificadas***

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Industrial

Orientador: José António Mendonça Dias, Professor Doutor,  
FCT-UNL

Co-orientador: José Fernando Gomes Requeijo, Professor Doutor,  
FCT-UNL

Co-orientador: Valter Martins Vairinhos, Professor Doutor,  
CINAV e CENTEC

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Virgílio António Cruz Machado  
Arguentes: Prof. Doutor Luís António de Andrade Ferreira  
Prof. Doutor Armando Luís Ferreira Leitão

Vogais: Prof. Doutor Filipe José Didelet Pereira  
Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral



**Setembro de 2013**



**Suzana Paula Gomes Fernando da Silva Lampreia**  
Mestre em Engenharia Industrial

***Manutenção Baseada no Estado de Condição. Uma  
Abordagem Utilizando Cartas de Controlo  
Modificadas***

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Industrial

Orientador: José António Mendonça Dias, Professor Doutor,  
FCT-UNL

Co-orientador: José Fernando Gomes Requeijo, Professor Doutor,  
FCT-UNL

Co-orientador: Valter Martins Vairinhos, Professor Doutor,  
CINAV e CENTEC

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Virgílio António Cruz Machado  
Arguentes: Prof. Doutor Luís António de Andrade Ferreira  
Prof. Doutor Armando Luís Ferreira Leitão

Vogais: Prof. Doutor Filipe José Didelet Pereira  
Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral



**Setembro de 2013**



Manutenção Baseada no Estado de Condição. Uma Abordagem Utilizando Cartas de Controlo Modificadas

Copyright © Suzana Paula Gomes Fernando da Silva Lampreia, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



“There are two kinds of inventors. There is the inventor who just likes to be clever and come up with a new idea. And there is the inventor who realizes there is a need and tries to fill it.”

Bill Lear

## **DEDICATÓRIA**

À minha Família

Aos meus Amigos

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço o apoio prestado pelo Professor José António Mendonça Dias no que diz respeito à orientação científica deste trabalho.

Agradeço o apoio prestado pelo Professor José Fernando Gomes Requeijo no que diz respeito à coorientação científica deste trabalho, principalmente na área do controlo estatístico com cartas de controlo.

Agradeço o apoio prestado pelo Professor Valter Martins Vairinhos no que diz respeito à coorientação científica deste trabalho na área da estatística e gestão da manutenção.

Agradeço o apoio prestado pelo Professor Vítor Sousa Lobo que em nome do CINAV e Escola Naval apoiou as exposições públicas de artigos na área desta dissertação.

Agradeço a troca de ideias com o Engenheiro Rui Ribeiro Parreira no que diz respeito à área das vibrações.

Agradeço ao comando e aos chefes com quem servi, e que me proporcionaram a disponibilidade de realização da presente tese e o desenvolvimento de todos os trabalhos relacionados.

Agradeço à minha família e aos meus amigos, aos quais muitas vezes me privei da sua companhia para me dedicar a este trabalho.

Agradeço o apoio prestado pela Engenheira Patrícia pelas horas passadas em conjunto na recolha de dados e nas discussões técnicas sobre diferentes métodos.

Finalmente, agradeço a todos os que não mencionei e que direta ou indiretamente contribuíram para realizar um trabalho que tanto desejei concretizar.

A todos *um bem hajam!*



## RESUMO

Na Marinha, como na indústria, a manutenção condicionada é hoje em dia, a política de manutenção tendencialmente mais usada. Vários fatores contribuem para esse efeito, nomeadamente a necessidade imperiosa de evitar gastar recursos inutilmente, aplicando-os apenas e quando a manutenção é necessária para garantir as altas taxas de disponibilidade e segurança exigidas. Trata-se, pois, de uma forma de manutenção baseada essencialmente, em informação e, mais especificamente, no conhecimento preciso do estado dos equipamentos em cada instante. Isto significa a recolha contínua de dados acerca dos equipamentos e o seu tratamento em tempo real (*online*) por técnicas estatísticas adequadas aos processos de decisão nesta área. Só o atual estado de desenvolvimento tecnológico permite concretizar essas políticas com sucesso, o que explica que, sendo conhecidas há décadas, só agora se assista ao seu uso generalizado.

Especificamente, a monitorização *online*, em detrimento da *offline*, pode contribuir significativamente para uma melhoria do conhecimento do estado ou condição dos equipamentos e contribuir para a definição do *timing* correto das intervenções de acordo com os fatores externos associados e exigidos pelos gestores de projeto das organizações. São assim minimizadas as intervenções associadas a falsos alarmes ou determinadas por planos desfasados da realidade. Podem, também, ser evitadas eventuais avarias catastróficas que conduzam a uma perda total do equipamento.

A tese fundamental deste trabalho é a de que as Cartas de Controlo usadas para Controlo Estatístico de Processos (*SPC*) mas aplicadas agora a dados de funcionamento de equipamentos, podem ser um instrumento fundamental no diagnóstico e predição de avarias mecânicas num contexto de manutenção condicionada. Nesta investigação não só foi desenvolvida uma metodologia que incluiu a adaptação e desenvolvimento de algumas cartas de controlo neste domínio, como a respetiva validação experimental usando principalmente – mas não só – dados de vibração de equipamentos mecânicos recolhidos em condições experimentais (eletrobomba montada numa oficina da Escola Naval) como dados observacionais reais recolhidos de máquinas propulsoras Navais (turbinas a gás e motores *diesel*).

Pretendeu-se criar um modelo que admita adaptações de acordo com as exigências de normativos em vigor, as definições do fabricante e os requisitos do utilizador, podendo assim haver ajustamento nas regras que impõem uma intervenção.

Neste sentido, para amostras grandes, consideram-se duas fases na aplicação das cartas de controlo. Na primeira fase é testada a independência e normalidade das variáveis. Caso a independência, eventualmente, não se verifique, os dados podem ser modelados usando um modelo da família *ARIMA* ( $p, d, q$ ), sendo calculados os resíduos do modelo ajustado, definindo assim os parâmetros de funcionamento dos equipamentos. Na segunda fase, calculam-se os erros de previsão do modelo ajustado de forma a permitir a monitorização *online* através de cartas especiais modificadas univariadas, e cartas tradicionais e especiais multivariadas. Para amostras pequenas - caso dos equipamentos propulsores - aplicam-se as cartas de controlo *Short Run* com uma só fase e em que a monitorização é efetuada a partir da quarta observação.

O estudo experimental evidenciou resultados encorajadores - nomeadamente aplicabilidade, flexibilidade e adaptabilidade - que levam a admitir que a aplicação futura da metodologia proposta pode contribuir para uma manutenção mais eficaz e eficiente.

### Palavras Chave

Manutenção Condicionada, Monitorização *Online*, Cartas de Controlo Modificadas, Medição e Análise de Vibrações



## **ABSTRACT**

In the Navy, as in industry, condition maintenance is nowadays the preferred maintenance policy. Several factors contribute to this effect, namely the imperative need to avoid spending resources unnecessarily, and applying them only when maintenance is required to ensure high levels of availability and security. It is, therefore, a way of maintaining essentially based on information, and more specifically, on the precise knowledge of equipment condition or state at each time. This means the continuous collection of data on the equipment and its processing and analysis in real time (online) using statistical techniques serving the decision-making process in this field. Only the current state of technological development allows successful implementations of these policies, which explains that, known for decades, only now we see their widespread use.

Specifically, online monitoring, at the expense of offline, can significantly contribute to improving knowledge of the state or condition of the equipment and contribute to define the correct timing for interventions, according to external factors and required by organizations project managers. This allows also the reduction of interventions associated with false alarms or determined by plans incompatible with reality. This can also avoid catastrophic failures resulting in a total loss of the equipment.

The fundamental thesis of this work is that the Control Charts used for Statistical Process Control (SPC) but now applied to equipment operating data, can be a key tool for the diagnosis and prediction of mechanical failure in the context of condition based maintenance. With this research not only a methodology that includes the adaptation and development of some control charts for this area was developed, the respective experimental validation were concretize. For that was used, mainly - but not only - vibration data of mechanical equipment collected under experimental conditions (electric pump mounted in a workshop Naval School) and observational data collected from real Naval propulsion machinery (gas turbines and diesel engines).

The intention was to create a model that admits adaptations according to the regulatory requirements in force, the manufacturer's settings and user requirements allowing some adjustment in the rules used to detect the need for interventions.

For large samples, we consider two stages in the application of control charts. In the first stage, variables independency and normality are tested. If the independence hypothesis is rejected, the data can be modelled using a model from the ARIMA (p, d, q) family the residues of the fitted model being calculated and, thereby defining the operating parameters of the equipment. In the second phase, the forecasting errors of the fitted model are calculated and used, allowing online monitoring through modified special control charts, and univariate and multivariate traditional control charts. For small samples, as for the case of propulsion units, the Short Run control charts with a single phase are applied, and the monitoring is possible since fourth observation.

The experimental study showed encouraging results, including applicability, flexibility and adaptability, leading to admit that the future application of the proposed methodology can contribute to a more effective and efficient maintenance.

## **Keywords**

On Condition Maintenance, Online Monitoring, Modified Control Charts, Vibration Measurement and Analysis.



## ÍNDICE DE MATÉRIAS

	<i>Pág.</i>
<i>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</i> .....	<i>1</i>
<i>1.1 Enquadramento da Dissertação</i> .....	<i>3</i>
<i>1.2. Objetivos da Dissertação</i> .....	<i>4</i>
<i>1.3. Aplicação dos Métodos Desenvolvidos</i> .....	<i>5</i>
<i>1.4. Organização da Dissertação</i> .....	<i>5</i>
<i>CAPÍTULO 2 - MANUTENÇÃO BASEADA NA MONITORIZAÇÃO OFFLINE &amp; ONLINE</i> .....	<i>7</i>
.....	<i>7</i>
<i>2.1 Introdução</i> .....	<i>9</i>
<i>2.2 Manutenção Baseada em Dados Históricos – Monitorização Offline</i> .....	<i>10</i>
<i>2.2.1 Gestão da Manutenção</i> .....	<i>10</i>
<i>2.2.2 A Manutenção na Organização</i> .....	<i>14</i>
<i>2.2.2.1 Sistemas de Recolha e Tratamento de Dados</i> .....	<i>16</i>
<i>2.2.2.2 Vibrações Offline na Organização</i> .....	<i>18</i>
<i>2.2.3 Metodologias de Manutenção - Controlo de Condição</i> .....	<i>18</i>
<i>2.2.3.1 Sistemas e Técnicas de Controlo de Condição</i> .....	<i>19</i>
<i>2.2.4 Sistemas Reparáveis</i> .....	<i>20</i>
<i>2.2.4.1 Algumas Metodologias Utilizadas em Manutenção de Sistemas Reparáveis</i> .....	<i>23</i>
<i>2.3 Manutenção Baseada no Estado de Condição - Online</i> .....	<i>26</i>
<i>2.3.1 Medição e Análise de Vibrações</i> .....	<i>27</i>
<i>2.3.1.1 Medição de Vibrações</i> .....	<i>28</i>
<i>2.3.1.2 Análise de Vibrações</i> .....	<i>31</i>
<i>2.3.1.2.1 Desequilíbrio</i> .....	<i>32</i>
<i>2.3.1.2.2 Desalinhamento</i> .....	<i>33</i>
<i>2.3.1.2.3 Veio Empenado</i> .....	<i>35</i>
<i>2.3.1.2.4 Rolamento Enviesado</i> .....	<i>36</i>
<i>2.3.1.2.5 Ressonâncias</i> .....	<i>36</i>
<i>2.3.1.2.6 Avarias em Rolamentos</i> .....	<i>37</i>
<i>2.3.1.2.7 Forças Hidráulicas e Aerodinâmicas</i> .....	<i>38</i>
<i>2.3.1.2.8 Avarias Típicas em Equipamentos</i> .....	<i>39</i>
<i>2.4 Considerações</i> .....	<i>42</i>

<i>CAPÍTULO 3 - MANUTENÇÃO CONDICIONADA COM APLICAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLO MODIFICADAS</i> .....	45
<i>3.1 O Controlo Estatístico na Manutenção</i> .....	47
<i>3.1.1 Técnicas Estatísticas na Atualidade e a Manutenção</i> .....	48
<i>3.1.2 As Cartas de Controlo Modificadas Aplicadas em Manutenção Condicionada</i> .....	50
<i>3.2 Monitorização da Condição com Cartas de Controlo Modificadas - Fase 1</i> .....	52
<i>3.2.1 Cartas de Controlo Univariadas Tradicionais</i> .....	53
<i>3.2.1.1 Cartas de Controlo de Observações Individuais e Amplitude Móvel</i> .....	53
<i>3.2.1.2 Cartas de Controlo da Média e da Amplitude</i> .....	55
<i>3.2.2 Cartas de Controlo Multivariadas Tradicionais</i> .....	57
<i>3.2.2.1 Controlo do Vetor Média</i> .....	59
<i>3.3 Auto-correlação dos Dados</i> .....	61
<i>3.3.1 Independência dos Dados</i> .....	61
<i>3.3.1.1 Função de Auto-correlação</i> .....	61
<i>3.3.1.2 Função de Auto-correlação Parcial</i> .....	62
<i>3.3.2 Cartas de Controlo de Processos com Dados Auto-correlacionados</i> .....	63
<i>3.3.2.1 Modelação do Processo – Modelo de ARIMA</i> .....	64
<i>3.3.2.1.1 Identificação</i> .....	66
<i>3.3.2.1.2 Estimação</i> .....	68
<i>3.3.2.1.3 Validação</i> .....	68
<i>3.4 Monitorização de Equipamentos - Fase 2</i> .....	70
<i>3.4.1 Cartas de Controlo Especiais Univariadas</i> .....	71
<i>3.4.1.1 Cartas de Controlo CUSUM</i> .....	71
<i>3.4.1.1.1 Carta CUSUMM - Metodologia</i> .....	75
<i>3.4.1.2 Cartas de Controlo EWMA</i> .....	76
<i>3.4.1.1.2 Carta EWMAM - Metodologia</i> .....	78
<i>3.4.2 Cartas de Controlo Tradicionais Multivariadas</i> .....	80
<i>3.4.2.1 Cartas de Controlo Multivariadas - <math>T^2</math></i> .....	80
<i>3.4.2.1.1 Interpretação de Outliers de Dados Multivariados</i> .....	81
<i>3.4.2.1.2 <math>T^2</math> Modificada - Metodologia</i> .....	84
<i>3.4.3 Cartas de Controlo Especiais Multivariadas</i> .....	86
<i>3.4.3.1 Carta de Controlo CUSUM Multivariada Modificada - MCUSUMM</i> .....	87
<i>3.4.3.1.1 MCUSUMM - Metodologia</i> .....	88
<i>3.4.3.2 Cartas de Controlo Multivariadas EWMA - MEWMAM</i> .....	90

	<i>Pág.</i>
3.4.3.2.1 MEWMAM - Metodologia.....	91
3.5 Cartas de Controlo Short Run Modificadas .....	92
3.5.1 Condição de Aplicação das Cartas de Controlo ShortRun .....	92
3.5.2 Cartas de Controlo Q .....	93
3.5.2.1 Cartas de Controlo QM.....	93
3.5.2.1.1 QM – Metodologia.....	94
3.5.2.2 Cartas Short Run Especiais Modificadas.....	96
3.5.2.2.1 Carta CUSUMQ Modificada .....	96
3.5.2.2.1.1 CUSUMQM - Metodologia.....	96
3.5.2.2.2 Carta EWMAQ Modificada .....	97
3.5.2.2.2.1 EWMAQM - Metodologia.....	98
3.5.3 Cartas de Controlo MQ.....	99
3.5.3.1 MQM - Metodologia.....	101
3.5.4 Cartas de Controlo Multivariadas Especiais para Short Run.....	102
3.5.4.1 Carta MCUSUMQ Modificada .....	102
3.5.4.1.1 MCUSUMQM – Metodologia.....	102
3.5.4.2 Carta MEWMAQ Modificada.....	104
3.5.4.1.1 Carta MEWMAQM – Metodologia.....	104
3.6 Considerações.....	105
<b>CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A MÁQUINAS PROPULSORAS.....</b>	<b>107</b>
4.1 Enquadramento da Implementação da Metodologia.....	109
4.2 Equipamentos em Laboratório.....	109
4.2.1 Caraterísticas do Equipamento de Medição de Vibrações.....	109
4.2.2 Eletrobomba .....	110
4.2.3 Os Limites de Vibração Considerados .....	112
4.3 Aplicação de Cartas de Controlo Univariadas.....	113
4.3.1 Fase 1 .....	113
4.3.2 Fase 2 .....	119
4.4 Aplicação de Cartas de Controlo Multivariadas .....	125
4.4.1 Fase 1 .....	126
4.4.2 Fase 2 .....	127
4.5 Diagnóstico .....	132

	<i>Pág.</i>
4.6 Considerações .....	135
<i>CAPÍTULO 5 - MANUTENÇÃO CONDICIONADA COM APLICAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLO MODIFICADAS</i> .....	<i>137</i>
5.1. <i>Caraterísticas das Máquinas Propulsoras</i> .....	<i>139</i>
5.1.1 <i>Turbinas a Gás</i> .....	<i>139</i>
5.1.2 <i>Motores Diesel</i> .....	<i>142</i>
5.2 <i>Aplicação da Metodologia a Turbinas a Gás</i> .....	<i>144</i>
5.2.1 <i>Aplicação das Cartas Controlo QM a Turbinas a Gás</i> .....	<i>144</i>
5.2.2 <i>Aplicação da Carta Controlo CUSUMQM a Turbinas a Gás</i> .....	<i>146</i>
5.2.3 <i>Aplicação Carta Controlo EWMAQM a Turbinas a Gás</i> .....	<i>147</i>
5.2.4 <i>Aplicação Carta Controlo MQM a Turbinas a Gás</i> .....	<i>149</i>
5.2.5 <i>Aplicação Carta Controlo MCUSUMQM a Turbinas a Gás</i> .....	<i>149</i>
5.2.6 <i>Aplicação Carta Controlo MEWMAQM a Turbinas a Gás</i> .....	<i>150</i>
5.3 <i>Aplicação da Metodologia a Motores Diesel</i> .....	<i>151</i>
5.3.1 <i>Aplicação Carta Controlo QM a Motores Diesel</i> .....	<i>151</i>
5.3.2 <i>Aplicação Cartas Controlo CUSUMQM a Motores Diesel</i> .....	<i>152</i>
5.3.3 <i>Aplicação das Cartas Controlo EWMAQM a Motores Diesel</i> .....	<i>153</i>
5.3.4 <i>Aplicação Cartas Controlo MQM a Motores Diesel</i> .....	<i>154</i>
5.3.5 <i>Aplicação das Cartas Controlo MCUSUMQM a Motores Diesel</i> .....	<i>155</i>
5.3.6 <i>Aplicação das Cartas Controlo MEWMAQM a Motores Diesel</i> .....	<i>155</i>
5.4 <i>Aplicação das Cartas para Amostras Grandes com Simulação Dados</i> .....	<i>156</i>
5.4.1 <i>Fase 1 – Definição dos Parâmetros de Funcionamento da TGI</i> .....	<i>156</i>
5.4.2 <i>Fase 2 – Monitorização com Cartas de Controlo Multivariadas</i> .....	<i>158</i>
5.5 <i>Considerações</i> .....	<i>162</i>
<i>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E INVESTIGAÇÃO FUTURA</i> .....	<i>165</i>
6.1 <i>Análise dos Resultados</i> .....	<i>167</i>
6.2 <i>Conclusões</i> .....	<i>169</i>
6.3 <i>Investigação Futura</i> .....	<i>170</i>
<i>BIBLIOGRAFIA</i> .....	<i>173</i>
<i>ANEXO I - FATORES PARA CONSTRUÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO DE VARIÁVEIS</i> .	<i>181</i>

	<i>Pág.</i>
<i>ANEXO II - ÁBACOS</i> .....	185
<i>II.1 Ábacos para as cartas CUSUM e CUSUM-FIR</i> .....	187
<i>II.2 Ábacos para as cartas EWMA</i> .....	191
<i>ANEXO III - COMPLEMENTO DE VIBRAÇÕES</i> .....	193
<i>ANEXO IV - COMPLEMENTO DA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA NUM PROTÓTIPO</i> .....	199
<i>IV.1 Cartas Univariadas</i> .....	201
<i>IV.1.1 Fase 1</i> .....	201
<i>IV.1.1.1 Resultados da Var1</i> .....	201
<i>IV.1.1.2 Resultados da Var3</i> .....	204
<i>IV.1.1.3 Resultados da Var4</i> .....	207
<i>IV.1.2 Fase 2</i> .....	210
<i>IV.1.2.1 Resultados da Var1</i> .....	210
<i>IV.1.2.2 Resultados da Var2</i> .....	212
<i>IV.1.2.3 Resultados da Var3</i> .....	217
<i>IV.1.2.4 Resultados da Var4</i> .....	220
<i>IV.2 Diagnóstico</i> .....	223
<i>IV.2.1 Resultados da Var1</i> .....	223
<i>IV.2.2 Resultados da Var3</i> .....	224
<i>IV.2.3 Resultados da Var4</i> .....	226
<i>ANEXO V - COMPLEMENTO DA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA EM MÁQUINAS PROPULSORAS</i> .....	229
<i>V.1 Turbinas a Gás</i> .....	231
<i>V.1.1 Aplicação Univariada das Cartas Short-Run</i> .....	231
<i>V.1.2 Aplicação Multivariada das Cartas Short Run</i> .....	237
<i>V.2 Motores Diesel</i> .....	238
<i>V.2.1 Aplicação Univariada das Cartas Short-Run</i> .....	238
<i>V.2.2 Aplicação Multivariada das Cartas Short Run</i> .....	244

	<i>Pág.</i>
<i>ANEXO VI - ARTIGOS PUBLICADOS</i> .....	251
<i>Artigo Revista Propulsor 2013</i> .....	253
<i>Artigo ICOVP2013</i> .....	264
<i>GLOSSÁRIO</i> .....	.293

## ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

<i>Figura 2.1 Políticas de manutenção</i> .....	11
<i>Figura 2.2 Ciclo de uma instalação</i> .....	13
<i>Figura 2.3 Curva da banheira</i> .....	13
<i>Figura 2.4 Custos de sistemas em função da sua idade</i> .....	14
<i>Figura 2.5 Funcionamento do ciclo de planeamento do SGM/SMP</i> .....	15
<i>Figura 2.6 Etapas da criação da base de dados</i> .....	17
<i>Figura 2.7 Exemplo de um Sistema Reparável</i> .....	21
<i>Figura 2.8 Pirâmide Estrutural</i> .....	25
<i>Figura 2.9 Estrutura de monitorização</i> .....	27
<i>Figura 2.10 Ponteiras de sensores de vibração</i> .....	30
<i>Figura 2.11 Desequilíbrio estático</i> .....	33
<i>Figura 2.12 Causas do desalinhamento</i> .....	34
<i>Figura 2.13 Equipamentos a vibrar por desalinhamento</i> .....	35
<i>Figura 2.14 Vibrações em veio empenado</i> .....	36
<i>Figura 2.15 Vibrações em rolamento enviesado</i> .....	36
<i>Figura 2.16 Frequência de ressonância</i> .....	37
<i>Figura 2.17 Avarias em rolamentos – espectro com bandas laterais</i> .....	38
<i>Figura 2.18 Frequência de passagem de pás</i> .....	38
<i>Figura 2.19 Turbulência do fluxo</i> .....	39
<i>Figura 2.20 Cavitação</i> .....	39
<i>Figura 2.21 Espectro de uma avaria numa bomba</i> .....	40
<i>Figura 2.22 Detecção de Avarias em ventiladores de consola</i> .....	40
<i>Figura 2.23 Detecção avarias em ventiladores de consola, caso pá danificada</i> .....	41
<i>Figura 2.24 Avaria no estator de um motor elétrico</i> .....	41
<i>Figura 2.25 Avarias em rotores excêntricos</i> .....	42
<i>Figura 3.1 Metodologia de aplicação das cartas de controlo modificadas em manutenção condicionada</i> .....	51
<i>Figura 3.2 Regras para a intervenção</i> .....	52
<i>Figura 3.3 Tipo de cartas de controlo tradicionais</i> .....	52
<i>Figura 3.4 Regras de deteção de causas especiais</i> .....	53
<i>Figura 3.5 Elipse de Controlo</i> .....	57
<i>Figura 3.6 Função de Auto-Correlação Estimada</i> .....	57
<i>Figura 3.7 Função de Auto-Correlação Parcial Estimada</i> .....	65
<i>Figura 3.8 Sequência de aplicação do modelo ARIMA</i> .....	65

	Pág.
<i>Figura 3.9 V-Mask</i> .....	72
<i>Figura 3.10 Metodologia de aplicação da carta de controlo CUSUMM</i> .....	75
<i>Figura 3. 11 Metodologia de aplicação da carta de controlo EWMAM</i> .....	79
<i>Figura 3.12 Metodologia de aplicação da carta de controlo T<sup>2</sup>M</i> .....	85
<i>Figura 3.13 Metodologia de aplicação da carta de controlo MCUSUMM</i> .....	89
<i>Figura 3.14 Metodologia de aplicação da carta de controlo MEWMAM</i> .....	91
<i>Figura 3.15 Metodologia de aplicação da carta de controlo QM</i> .....	95
<i>Figura 3.16 Metodologia de aplicação da carta de controlo CUSUMQM</i> .....	97
<i>Figura 3.18 Metodologia de aplicação da carta de controlo MQM</i> .....	101
<i>Figura 3.19 Metodologia de aplicação da carta de controlo MCUSUMQM</i> .....	103
<i>Figura 3.20 Metodologia de aplicação da carta de controlo MEWMAQM</i> .....	105
<i>Figura 4.1 Equipamento de recolha de dados: CSI 2130 da Emerson</i> .....	110
<i>Figura 4.2 Sensor - Acelerómetro usado na recolha de dados: A0760GP</i> .....	110
<i>Figura 4.3 Eletrobomba de água e pontos de análise de vibração</i> .....	110
<i>Figura 4.4 Medição de vibração num ponto do protótipo</i> .....	111
<i>Figura 4.5 FACE dos dados não revistos - Var2</i> .....	113
<i>Figura 4.6 FACPE dos dados não revistos - Var2</i> .....	113
<i>Figura 4.7 FACE dos resíduos não revistos - Var2</i> .....	114
<i>Figura 4.8 FACPE dos resíduos não revistos - Var2</i> .....	114
<i>Figura 4.9 Carta de controlo e -MR dos resíduos com dados não revistos - Var2</i> .....	115
<i>Figura 4.10 FACE dos dados - Var2</i> .....	115
<i>Figura 4.11 FACPE dos dados - Var2</i> .....	116
<i>Figura 4.12 FACE dos resíduos - Var2</i> .....	116
<i>Figura 4.13 FACPE dos resíduos - Var2</i> .....	116
<i>Figura 4.14 Carta de controlo e -MR dos resíduos - Var2</i> .....	117
<i>Figura 4.15 Verificação da normalidade dos resíduos revistos - Var2</i> .....	118
<i>Figura 4.16 Carta CUSUMM - sem avaria <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	120
<i>Figura 4.17 Carta CUSUMM - 1º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	120
<i>Figura 4.18 Carta CUSUMM - 2º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	121
<i>Figura 4.19 Carta CUSUMM - 3º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	121
<i>Figura 4.20 Carta CUSUMM - 4º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	121
<i>Figura 4.21 Carta CUSUMM - 4º agravamento da avaria para <math>\Delta=1\sigma</math></i> .....	122
<i>Figura 4.22 Carta CUSUMM - 4º agravamento da avaria para <math>\Delta=1,5\sigma</math></i> .....	122

	<i>Pág.</i>
<i>Figura 4.23 Carta EWMAM – sem avaria <math>\Delta=0,5\sigma</math>.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 4.24 Carta EWMAM – 1º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math>.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 4.25 Carta EWMAM – 2º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math>.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 4.26 Carta EWMAM – 3º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math>.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 4.27 Carta EWMAM – 4º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math>.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 4.28 Carta EWMAM – 4º agravamento da avaria para <math>\Delta=1,0\sigma</math>.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 4.29 Carta EWMAM – 4º agravamento da avaria para <math>\Delta=1,5\sigma</math>.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 4.30 Fase 1 - carta <math>T^2</math>.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 4.31 Fase 2 - carta <math>T^2</math> – 0, 1º, 2º agravamento da avaria.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 4.32 Fase 2 - carta <math>T^2</math> – 3º agravamento da avaria.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 4.33 Fase 2 - carta <math>T^2</math> - 4º agravamento da avaria.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 4.34 Fase 2 - carta MCUSUMM – 0, 1º, 2º agravamento da avaria.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 4.35 Fase 2 - carta MCUSUMM – 3º agravamento da avaria.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 4.36 Fase 2 - carta MCUSUMM - 4º agravamento da avaria.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 4.37 Fase 2 - carta MEWMAM – 0, 1º, 2º agravamento da avaria.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 4.38 Fase 2 - carta MEWMAM – 3º agravamento da avaria.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 4.39 Fase 2 - carta MEWMAM - 4º agravamento da avaria.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 4.40 Fase 2 - carta MEWMAM - 4º agravamento da avaria - <math>\lambda=0,13</math>.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 4.41 Análise de frequência – sem avaria.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 4.42 Análise de frequência – 1º agravamento.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 4.43 Análise de frequência – 2º agravamento.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 4.44 Análise de frequência – 3º agravamento.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 4.45 Análise de frequência – 4º agravamento.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 4.46 Integração de sistema controlo.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 5.1 Turbina a gás (Fonte: Centerfield, 2013).....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 5.2 Motor Diesel (MTU, 2013).....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 5.3 Carta QM para sensor SNV0474.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 5.4 Carta QM para sensor SNV0475.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 5.5 Carta QM para sensor SNV0476.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 5.6 Carta QM para sensor SNV0477.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 5.7 Carta CUSUMQM para sensor SNV0474 para <math>k=0,25</math>.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 5.8 Carta CUSUMQM para sensor SNV0476 com <math>k=0,25</math>.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 5.9 Carta EWMAQM para sensor SNV0474 com <math>\lambda=0,05</math>.....</i>	<i>147</i>

	Pág.
Figura 5.10 Carta EWMAQM para sensor SNV0474 com $\lambda=0,13$ .....	148
Figura 5.11 Carta EWMAQM para sensor SNV0474 com $\lambda=0,25$ .....	148
Figura 5.12 Carta EWMAQM para sensor SNV0476 com $\lambda=0,25$ .....	148
Figura 5.13 Carta MQM para TG2 .....	149
Figura 5.14 Carta MCUSUMQM para TG2 .....	150
Figura 5.15 Carta MEWMAQM para TG2.....	150
Figura 5.16 MD1 - Carta QM para sensor OP0155 .....	151
Figura 5.17 MD1 - Carta QM para sensor OT0114 .....	151
Figura 5.18 MD1 - Carta QM para sensor OP0157 .....	152
Figura 5.19 MD1 - Carta QM para sensor FP0163.....	152
Figura 5.20 MD1 - Carta CUSUMQM para sensor OT0114 com $K=0,25$ .....	153
Figura 5.21 MD1 - Carta CUSUMQM para sensor FP0163 com $k=0,25$ .....	153
Figura 5.22 MD1 - Carta EWMAQM para sensor OT0114 com $\lambda=0,25$ .....	154
Figura 5.23 MD1 - Carta EWMAQM para sensor FP0163 com $\lambda= 0,25$ .....	154
Figura 5.24 MD1 - Carta MQM .....	154
Figura 5.25 MD1 - Carta MCUSUMQM .....	155
Figura 5.26 MD1 - Carta MEWMAQM.....	155
Figura 5.27 Carta de controlo X-MR .....	156
Figura 5.28 FACE dos dados .....	157
Figura 5.29 FACPE dos dados.....	157
Figura 5.30 Fase 1 - Carta $T^2$ .....	158
Figura 5.31 Fase 2 - Carta $T^2$ - 3º agravamento da avaria.....	159
Figura 5.32 Fase 2 - Carta $T^2$ - 4º agravamento da avaria.....	160
Figura 5.33 Fase 2 - Carta CUSUMM - 3º agravamento da avaria .....	161
Figura 5.34 Fase 2 - Carta CUSUMM - 4º agravamento da avaria .....	161
Figura 5.35 Fase 2 - Carta MEWMAM - 3º agravamento da avaria.....	162
Figura 5.36 Fase 2 - Carta MEWMAM - 4º agravamento da avaria.....	162
Figura II.1 Combinação de $k$ e $h$ da carta CUSUM, com $C_0=0$ e $T_0=0$ , para vários valores de $ARL_{EmControlo}$ .....	187
Figura II.2 Combinação de $k$ e $h$ da carta CUSUM, com $C_0=0$ e $T_0=0$ , para vários valores de $ARL_{EmControlo}$ .....	188
Figura II.3 Combinação de $k$ e $h$ da carta CUSUM, com $C_0=0$ e $T_0=0$ , para vários valores de $ARL_{EmControlo}$ .....	189

<i>Figura II.4</i> Combinação de $k$ e $h$ da carta CUSUM, com $C_0 = 0$ e $T_0 = 0$ , para vários valores de $ARL_{EmControlo}$ .....	190
<i>Figura II.5</i> Valor $\lambda$ , da carta EWMA, para vários valores de $ARL_{EmControlo}$ .....	191
<i>Figura II.6</i> Valor $\lambda$ , da carta EWMA, para vários valores de $ARL_{EmControlo}$ .....	191
<i>Figura II.7</i> Valores de $\lambda$ e $K$ , da carta EWMA, em função de $ARL_{EmControlo}$ .....	192
<i>Figura IV.1</i> FACE dos dados - Var1 .....	201
<i>Figura IV.2</i> FACPE dos dados - Var1 .....	201
<i>Figura IV.3</i> FACE dos resíduos - Var1 .....	202
<i>Figura IV.4</i> FACPE dos resíduos - Var1 .....	202
<i>Figura IV.5</i> Carta de controlo e -MR dos resíduos - Var1 .....	203
<i>Figura IV.6</i> Verificação da Normalidade resíduos - Var1 .....	203
<i>Figura IV.7</i> FACE dos dados - Var3 .....	204
<i>Figura IV.8</i> FACPE dos dados - Var3 .....	204
<i>Figura IV.9</i> FACE dos resíduos - Var3 .....	205
<i>Figura IV.10</i> FACPE dos resíduos - Var3 .....	205
<i>Figura IV.11</i> Carta de controlo e -MR dos resíduos - Var3 .....	206
<i>Figura IV.12</i> Verificação da Normalidade resíduos - Var3 .....	206
<i>Figura IV.13</i> FACE dos dados - Var4 .....	207
<i>Figura IV.14</i> FACPE dos dados - Var4 .....	207
<i>Figura IV.15</i> FACE dos resíduos - Var4 .....	208
<i>Figura IV.16</i> FACPE dos resíduos - Var4 .....	208
<i>Figura IV.17</i> Carta de controlo e -MR dos resíduos - Var4 .....	209
<i>Figura IV.18</i> Verificação da Normalidade resíduos - Var4 .....	209
<i>Figura IV.19</i> Carta CUSUMM - sem avaria e 1º e 2º agravamento para $\Delta = 0,5\sigma$ .....	210
<i>Figura IV.20</i> Carta CUSUMM - 3º agravamento para $\Delta = 0,5\sigma$ .....	210
<i>Figura IV.21</i> Carta CUSUMM - 4º agravamento da avaria para $\Delta = 0,5\sigma$ .....	211
<i>Figura IV.22</i> Carta EWMAM - sem avaria e 1º, 2º e 3º agravamento para $\Delta = 0,5\sigma$ .....	211
<i>Figura IV.23</i> Carta EWMAM - 4º agravamento da avaria para $\Delta = 0,5\sigma$ .....	211
<i>Figura IV.24</i> Carta CUSUMM - sem avaria para $\Delta = 1\sigma$ .....	212
<i>Figura IV.25</i> Carta CUSUMM - sem avaria para $\Delta = 1,5\sigma$ .....	212
<i>Figura IV.26</i> Carta CUSUMM - 1º agravamento da avaria para $\Delta = 1\sigma$ .....	212
<i>Figura IV.27</i> Carta CUSUMM - 1º agravamento da avaria para $\Delta = 1,5\sigma$ .....	213
<i>Figura IV.28</i> Carta CUSUMM - 2º agravamento da avaria para $\Delta = 1\sigma$ .....	213

	Pág.
<i>Figura IV.29 Carta CUSUMM – 2º agravamento da avaria para <math>\Delta=1,5\sigma</math></i> .....	213
<i>Figura IV.30 Carta CUSUMM – 3º agravamento da avaria para <math>\Delta=1\sigma</math></i> .....	214
<i>Figura IV.31 Carta CUSUMM – 3º agravamento da avaria para <math>\Delta=1,5\sigma</math></i> .....	214
<i>Figura IV.32 Carta EWMAM – sem avaria para <math>\Delta=1\sigma</math></i> .....	214
<i>Figura IV.33 Carta EWMAM – sem avaria para <math>\Delta=1,5\sigma</math></i> .....	215
<i>Figura IV.34 Carta EWMAM – 1º agravamento da avaria para <math>\Delta=1\sigma</math></i> .....	215
<i>Figura IV.35 Carta EWMAM – 1º agravamento da avaria para <math>\Delta=1,5\sigma</math></i> .....	215
<i>Figura IV.36 Carta EWMAM – 2º agravamento da avaria para <math>\Delta=1\sigma</math></i> .....	215
<i>Figura IV.37 Carta EWMAM – 2º agravamento da avaria para <math>\Delta=1,5\sigma</math></i> .....	216
<i>Figura IV.38 Carta EWMAM – 3º agravamento da avaria para <math>\Delta=1\sigma</math></i> .....	216
<i>Figura IV.39 Carta EWMAM – 3º agravamento da avaria para <math>\Delta=1,5\sigma</math></i> .....	216
<i>Figura IV.40 Carta CUSUMM – sem avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	217
<i>Figura IV.41 Carta CUSUMM – 1º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	217
<i>Figura IV.42 Carta CUSUMM – 2º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	217
<i>Figura IV.43 Carta CUSUMM – 3º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	218
<i>Figura IV.44 Carta CUSUMM – 4º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	218
<i>Figura IV.45 Carta EWMAM – sem avaria e 1º agravamento para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	218
<i>Figura IV.46 Carta EWMAM – 2º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	219
<i>Figura IV.47 Carta EWMAM – 3º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	219
<i>Figura IV.48 Carta EWMAM – 4º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	219
<i>Figura IV.49 Carta CUSUMM – sem avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	220
<i>Figura IV.50 Carta CUSUMM – 1º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	220
<i>Figura IV.51 Carta CUSUMM – 2º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	220
<i>Figura IV.52 Carta CUSUMM – 3º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	221
<i>Figura IV.53 Carta CUSUMM – 4º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	221
<i>Figura IV.54 Carta EWMAM – sem avaria e 1º agravamento para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	221
<i>Figura IV.55 Carta EWMAM – 2º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	222
<i>Figura IV.56 Carta EWMAM – 3º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	222
<i>Figura IV.57 Carta EWMAM – 4º agravamento da avaria para <math>\Delta=0,5\sigma</math></i> .....	222
<i>Figura IV.58 Análise espectral - sem avaria</i> .....	223
<i>Figura IV.59 Análise espectral - 1º agravamento</i> .....	223
<i>Figura IV.60 Análise espectral - 2º agravamento</i> .....	223
<i>Figura IV.61 Análise espectral - 3º agravamento</i> .....	224
<i>Figura IV.62 Análise espectral - 4º agravamento</i> .....	224

	<i>Pág.</i>
<i>Figura IV.63 Análise espectral - sem avaria.....</i>	224
<i>Figura IV.64 Análise espectral - 1º agravamento .....</i>	225
<i>Figura IV.65 Análise espectral - 2º agravamento .....</i>	225
<i>Figura IV.66 Análise espectral - 3º agravamento .....</i>	225
<i>Figura IV.67 Análise espectral - 4º agravamento .....</i>	226
<i>Figura IV.68 Análise espectral - sem avaria.....</i>	226
<i>Figura IV.69 Análise espectral - 1º agravamento .....</i>	227
<i>Figura IV.70 Análise espectral - 2º agravamento .....</i>	227
<i>Figura IV.71 Análise espectral - 3º agravamento .....</i>	227
<i>Figura IV.72 Análise espectral - 4º agravamento .....</i>	228
<i>Figura V.1 TG1 - carta QM para sensor SNV0474.....</i>	231
<i>Figura V.2 TG1 - carta QM para sensor SNV0475.....</i>	232
<i>Figura V.3 TG1 - carta QM para sensor SNV0476.....</i>	232
<i>Figura V.4TG1 - carta QM para sensor SNV0477.....</i>	232
<i>Figura V.5 TG1 - carta CUSUMQM para sensor SNV0374.....</i>	233
<i>Figura V.6 carta CUSUMQM para sensor SNV0376 .....</i>	233
<i>Figura V.7 TG2 - carta CUSUMQM para sensor SNV0475.....</i>	233
<i>Figura V.8 TG2 - carta CUSUMQM para sensor SNV0476 para k=0,5.....</i>	234
<i>Figura V.9 TG2 - carta CUSUMQM para sensor SNV0476 para k=0,75.....</i>	234
<i>Figura V.10 TG2 - carta CUSUMQM para sensor SNV0477.....</i>	234
<i>Figura V.11 TG1 - carta EWMAQM para sensor SNV0374 para <math>\lambda=0,05</math>.....</i>	235
<i>Figura V.12 TG1 - carta EWMAQM para sensor SNV0374 para <math>\lambda=0,13</math>.....</i>	235
<i>Figura V.13 TG1 - carta EWMAQM para sensor SNV0374 para <math>\lambda=0,25</math>.....</i>	235
<i>Figura V.14 TG1 - carta EWMAQM para sensor SNV0376 para <math>\lambda=0,25</math>.....</i>	236
<i>Figura V.15 TG2 - carta EWMAQM para sensor SNV0374 para <math>\lambda=0,05</math>.....</i>	236
<i>Figura V.16 TG2 - carta EWMAQM para sensor SNV0376 para <math>\lambda=0,13</math>.....</i>	236
<i>Figura V.17 TG1 - carta MQM para TG1.....</i>	237
<i>Figura V.18 Carta MCUSUMQM para TG1.....</i>	237
<i>Figura V.19 Carta MEWMAQM para TG1.....</i>	237
<i>Figura V.20 MD2 - carta QM para sensor OP0255 .....</i>	239
<i>Figura V.21 MD2 - carta QM para sensor OT0214.....</i>	239
<i>Figura V.22 MD1 - carta CUSUMQM para sensor OT0114 com k=0,5.....</i>	239
<i>Figura V.23 MD1 - Carta CUSUMQM para sensor OT0114 com k=0,75.....</i>	240
<i>Figura V.24 MD1 - carta CUSUMQM para sensor OT0114 com k=1.....</i>	240

<i>Figura V.25 MD2 - carta CUSUMQM para sensor SNV0475 com <math>k=0,25</math>.....</i>	<i>240</i>
<i>Figura V.26 MD2 - carta CUSUMQM para sensor OT0214 com <math>k=0,25</math>.....</i>	<i>241</i>
<i>Figura V.27 MD2 - carta CUSUMQM para sensor OP0257 com <math>k=0,25</math>.....</i>	<i>241</i>
<i>Figura V.28 MD1 - carta EWMAQM para sensor OP0114 com <math>\lambda= 0,05</math>.....</i>	<i>241</i>
<i>Figura V.29 MD1 - carta EWMAQM para sensor OT0114 com <math>\lambda=0,13</math>.....</i>	<i>242</i>
<i>Figura V.30 MD1 - carta EWMAQM para sensor FP0163 com <math>\lambda= 0,05</math>.....</i>	<i>242</i>
<i>Figura V.31 MD1 - carta EWMAQM para sensor FP0163 com <math>\lambda= 0,13</math>.....</i>	<i>242</i>
<i>Figura V.32 MD1 - carta EWMAQM para sensor OP0214 com <math>\lambda= 0,05</math>.....</i>	<i>243</i>
<i>Figura V.33 MD1 - carta EWMAQM para sensor OP0214 com <math>\lambda= 0,13</math>.....</i>	<i>243</i>
<i>Figura V.34 MD1 - carta EWMAQM para sensor OP0214 com <math>\lambda= 0,25</math>.....</i>	<i>243</i>
<i>Figura V.35 MD2 - carta MQM para sensor OP0214 com <math>\lambda= 0,25</math>.....</i>	<i>244</i>
<i>Figura V.36 MD2 - carta MCUSUMQM para sensor OP0214 com <math>\lambda= 0,25</math>.....</i>	<i>244</i>
<i>Figura V.37 MD2 - carta MEWMAQM para sensor OP0214 com <math>\lambda= 0,25</math>.....</i>	<i>245</i>
<i>Figura V.38 Fase 2 - 0 agravamento da avaria - simulação.....</i>	<i>246</i>
<i>Figura V.39 Fase 2 - 1º agravamento da avaria - simulação.....</i>	<i>246</i>
<i>Figura V.40 Fase 2 - 2º agravamento da avaria - simulação.....</i>	<i>247</i>
<i>Figura V.41 Fase 2 - 0 agravamento da avaria - simulação.....</i>	<i>247</i>
<i>Figura V.42 Fase 2 - 1º agravamento da avaria- simulação.....</i>	<i>247</i>
<i>Figura V.43 Fase 2 - 2º agravamento da avaria - simulação.....</i>	<i>248</i>
<i>Figura V.44 Fase 2 - 0 agravamento da avaria - simulação.....</i>	<i>248</i>
<i>Figura V.45 Fase 2 - 1º agravamento da avaria - simulação.....</i>	<i>249</i>
<i>Figura V.46 Fase 2 - 2º agravamento da avaria - simulação.....</i>	<i>249</i>

## ÍNDICE DE TABELAS

	Pág
<i>Tabela 2.1 Estágios da análise e predição de fiabilidade</i> .....	12
<i>Tabela 2.2 Pontos de medida definidos para turbinas a gás</i> .....	18
<i>Tabela 2.3 Características das medidas das turbinas a gás</i> .....	18
<i>Tabela 2.4 Ensaios não destrutivos</i> .....	19
<i>Tabela 2.5 Limites do estudo das vibrações</i> .....	29
<i>Tabela 2.6 Nível de vibração de máquinas com rotação entre 1500-3000rpm</i> .....	32
<i>Tabela 2.7 Tipos e características de desalinhamento</i> .....	34
<i>Tabela 3.1 Limites de Controlo da Carta Observações Individuais e Amplitude Móvel</i> .....	54
<i>Tabela 3.2 Limites de Controlo da Carta da Média e da Amplitude</i> .....	56
<i>Tabela 3.3 Exemplo de valor de m-amostras a recolher</i> .....	58
<i>Tabela 3.4 Limites de controlo para a carta <math>T^2</math></i> .....	60
<i>Tabela 3.5 Características teóricas da FAC e da FACP para os modelos</i> .....	68
<i>Tabela 3.6 Limites de Controlo das Cartas de Shewhart baseadas nos resíduos</i> .....	70
<i>Tabela 3.7 Cálculo da Média e do Desvio Padrão</i> .....	78
<i>Tabela 3.8 Decomposição de <math>T^2</math> em componentes ortogonais para <math>p=3</math></i> .....	83
<i>Tabela 3.9 <math>h</math> da carta MCUSUM para <math>k=0,5</math></i> .....	88
<i>Tabela 3.10 Cartas de controlo short run</i> .....	93
<i>Tabela 4.1 Características da eletrobomba</i> .....	111
<i>Tabela 4.2 Parâmetros para o equipamento com os dados não revistos – Var2</i> .....	114
<i>Tabela 4.3 Parâmetros para a Var2</i> .....	117
<i>Tabela 4.4 Parâmetros do modelo para as quatro variáveis</i> .....	118
<i>Tabela 4.5 Parâmetros do equipamento estimados para as quatro variáveis</i> .....	119
<i>Tabela 4.6 Limites carta CUSUM e <math>(T_L)N</math></i> .....	119
<i>Tabela 4.7 <math>T_L</math> correspondente a <math>(T_L)N</math></i> .....	120
<i>Tabela 4.8 Valores de <math>\lambda</math> e <math>\delta</math></i> .....	123
<i>Tabela 4.9 Desvio padrão para erros de previsão</i> .....	123
<i>Tabela 4.10 Valores de definição de limites</i> .....	126
<i>Tabela 4.11 Limite de alerta e limite superior de controlo da carta MCUSUM</i> .....	129
<i>Tabela 5.1 Sensores das turbinas a gás em investigação</i> .....	140
<i>Tabela 5.2 Limites de vibração da turbina</i> .....	141
<i>Tabela 5.3 Características motores diesel sob estudo (Marinha-ETNA, 2010b)</i> .....	142

<i>Tabela 5.4 Sensores do motor</i> .....	143
<i>Tabela 5.5 Limites dos sensores</i> .....	143
<i>Tabela 5.6 Valor dos limites para vários K para a carta CUSUMQM</i> .....	146
<i>Tabela 5.7 Valores da média e desvio padrão que geraram valores no MATLAB para o 3º e 4º agravamento</i> .....	159
<i>Tabela 5.8 Limite de alerta e limite superior de controlo da carta MCUSUMM TG1</i> .....	160
<i>Tabela I. 1 Fatores para construção das cartas de controlo de variáveis</i> .....	183
<i>Tabela III.1 ISO 2372-Vibration Severity</i> .....	195
<i>Tabela III.2 Soluções para problemas de vibrações</i> .....	196
<i>Tabela IV.1 Parâmetros do modelo ajustado à Var1</i> .....	203
<i>Tabela IV.2 Parâmetros do modelo ajustado à Var3</i> .....	206
<i>Tabela IV.3 Parâmetros do modelo ajustado à Var4</i> .....	209
<i>Tabela IV.4 <math>(T_L)_N</math> e <math>T_L</math></i> .....	210
<i>Tabela V.1 Sintomas anomalia vs alteração parâmetros em Aero-turbinas</i> .....	231
<i>Tabela V.2 Sintomas anomalia vs alteração parâmetros em motores de combustão interna</i> .....	238
<i>Tabela V.3 Valores da média e desvio padrão</i> .....	245

## **ABREVIATURAS**

<i>AL</i>	Alert Level
<i>AR</i>	Auto-regressive
<i>ARIMA</i>	Auto-regressive integrated Moving Average
<i>ARMA</i>	Mix of <i>AR</i> e <i>MA</i>
<i>ACF</i>	Auto-correlation Function
<i>AMSAA</i>	Army Material Systems Analysis Activity
<i>ARL</i>	Average Run Length
<i>BB</i>	Bombordo
<i>BPI</i>	Ball Pass Inner Race - Passagem de esferas na pista interior
<i>BPO</i>	Ball Pass Outer Race - Passagem de esferas na pista exterior
<i>BS</i>	Ball Spin - Frequência de Rotação das Esferas
<i>CARM</i>	Carta de Manutenção na Organização
<i>CBM</i>	Condition Based Maintenance
<i>CMS</i>	Condition Monitoring System
<i>CUSUM</i>	Cumulative Sum
<i>CUSUMM</i>	<i>CUSUM</i> Modificada
<i>DN</i>	Direção de Navios
<i>DSM58</i>	Documento de pedido de trabalho na Organização
<i>DSM59</i>	Documento de controlo de horas de funcionamento na Organização
<i>DSM60</i>	Documento de pedido de sobressalentes na Organização
<i>EB</i>	Estibordo
<i>EMA</i>	Estado Maior da Armada
<i>EPC</i>	Engineering Process Control
<i>ETNA</i>	Escola de Tecnologias Navais
<i>EWMA</i>	Exponentially Weighted Moving Average
<i>EWMAM</i>	<i>EWMA</i> Modificada
<i>EWMAST</i>	<i>EWMA</i> for Stationary Process
<i>FAC</i>	Função de Auto-correlação
<i>FACE</i>	Função de Auto-correlação Estimada
<i>FACP</i>	Função de Auto-correlação Parcial
<i>FACPE</i>	Função de Auto-correlação Parcial Estimada
<i>FMEA</i>	Failure Modes and Effects Analysis
<i>FMECA</i>	Fault Modes and Effects Criticality Analysis

<i>FT</i>	Fundamental Train ou Razão de Gaiola - Frequência de Gaiola
<i>GG</i>	Gerador de Gases
<i>H</i>	Horizontal
<i>HPP</i>	Processo de Poisson Homogéneo
<i>HPT</i>	High Pressure Turbine - Turbina de Alta Pressão
<i>Idle</i>	Ralenti
<i>IID</i>	Independentes e Identicamente Distribuídos
<i>ISHM</i>	Integrated System Health Management
<i>ISO</i>	International Standard Organization
<i>KS</i>	Kolmogorov-Smirnov
<i>Lags</i>	Desfasamentos
<i>LC</i>	Linha Central
<i>LIC</i>	Limite Inferior de Controlo
<i>LOSCA</i>	Lube Oil Storage and Conditioning Assembly (Unidade de Armazenamento e Tratamento do Óleo Lubrificante)
<i>LSC</i>	Limite Superior de Controlo
<i>MA</i>	Moving Average - Média Móvel
<i>MCEWMA</i>	Moving Centrer-line <i>EWMA</i>
<i>MCUSUMM</i>	Carta de controlo de somas acumuladas multivariada modificada
<i>MD</i>	Motor Diesel
<i>MD1</i>	Motor Diesel nº1
<i>MD2</i>	Motor Diesel nº2
<i>MDS</i>	Multidimensional Scaling (Escala Multidimensional)
<i>MEC</i>	Monitoring Equipment Condition
<i>MEWMAM</i>	Carta de controlo <i>EWMA</i> multivariada modificada
<i>MIMOSA</i>	Machinery Information Management Open Standards Alliance
<i>MQ</i>	Carta de Controlo <i>Short Run</i> Multivariada
<i>MQM</i>	Carta de Controlo <i>Short Run</i> Multivariada Modificada
<i>MR</i>	Moving Range
<i>MSI</i>	Maintenance & Safety Integrity Management
<i>MTBF</i>	Mean Time Between Failures
<i>NAUTOS</i>	Naval Automation System
<i>PHM</i>	Prognostics and Health Management
<i>pk</i>	Peak
<i>PPH</i>	Processo Poisson Homogéneo

<i>PPHM</i>	Processo Poisson Não Homogéneo
<i>PT</i>	Power Turbine - Turbina de Potência
<i>QM</i>	Carta de Controlo <i>Q</i> Univariada Modificada
<i>QC</i>	Questão Central
<i>QD</i>	Questão Derivada
<i>RBI</i>	Risk Based Inspection
<i>RBM</i>	Risk Based Management
<i>RCM</i>	Reliability Centered Maintenance
<i>RMS</i>	Root Mean Square
<i>RODS</i>	Reliability of Dormant Systems
<i>RPM</i>	Rotações por Minuto
<i>SGM</i>	Sistemas da Gestão da Manutenção
<i>SICALN</i>	Sistema de Informação de Configuração e Apoio dos navios
<i>SMP</i>	Sistema de Manutenção Planeada
<i>SPC</i>	Statistical Process Control
<i>SR</i>	Sistema Reparável
<i>SRTD</i>	Sistema de Recolha e Tratamento de Dados
<i>SSM</i>	Superintendência dos Serviços de Material
<i>T<sup>2</sup>M</i>	Carta de Controlo Multivariada Tradicional
<i>TG</i>	Turbina a Gás
<i>TG1</i>	Turbina a Gás nº 1
<i>TG2</i>	Turbina a Gás nº 2
<i>TPM</i>	Total Productive Maintenance
<i>V</i>	Vertical
<i>Var1</i>	Variável nº 1
<i>Var2</i>	Variável nº 2
<i>Var3</i>	Variável nº 3
<i>Var4</i>	Variável nº 4
<i>VMV</i>	Vetor de Monitorização de Vibrações (Vibration Monitoring Vector)



## SÍMBOLOS

$A_2$	Fatores limites de controlo 2 da carta da média
$A_3$	Fatores limites de controlo 3 da carta da média
$A_r$	Fator para cálculo da estatística <i>Short Run</i> multivariada
$B$	Operador de <i>Lags</i> (desfasamentos)
$B_3$	Fatores limites de controlo $B_3$ da carta do desvio padrão
$B_4$	Fatores limites de controlo $B_4$ da carta do desvio padrão
$Cov(X_t, X_{t+k})$	Covariância das observações intervaladas por $k$ instantes
$C_t$	Estatística da carta <i>CUSUM para os máximos</i> ; Estatística da carta <i>CUSUMQ</i> para os máximos;
$d$	Ordem de diferenciação para tornar o processo estacionário
$d_2$	Fator de linha central 2
$d_3$	Fator limite de controlo $d_3$ das cartas de amplitudes
$D_3$	Fator limite de controlo 3 das cartas de amplitudes
$D_4$	Fator limite de controlo 4 das cartas de amplitudes
$d_i$	Estatística $d$ para cada variável $i$ para detetar situações fora de controlo.
$E_0$	Valor inicial da variável $E$ de ( $E_0 = \mu_y$ )
$e_i$	Erro de previsão no instante $i$
$E_t$	Estatística da carta <i>EWMA</i> no instante $t$
$e_k$	Vetor dos erros de previsão
$e_t$	Resíduos para o instante $t$
$\bar{e}_t$	Média da amostra
$e_\tau(T)$	Erro de previsão
$E(X)$	Média de um processo
$F_{al}(x)$	Função probabilidade de avaria
$F_{\alpha;p;m-p}$	Percentil à direita para uma probabilidade $\alpha$ , da distribuição de Fisher com $p$ e $(m-p)$ graus de liberdade
$^{\circ}\text{C}$	Graus celsius
$G_v(\bullet)$	Distribuição de <i>T-student</i> em função de $v$ graus de liberdade
$h$	Parâmetro $h$ das cartas <i>CUSUM</i> ; limite da carta <i>CUSUM</i>
$h_0(t)$	Função de risco arbitrária, não especificada
$I$	Matriz identidade
$K$	Valores determinados em função do valor $\lambda$ e do <i>ARL</i> para a carta <i>EWMA</i>
$k$	Número de amostras; parâmetro da carta <i>CUSUM</i> ; valor de referência
$m$	Número de amostras

$M_r^2$	Fator para cálculo da estatística <i>Short Run</i> multivariada
$\overline{MR}$	Média da amplitude móvel
$n_f$	Número de falhas
$n$	Dimensão da amostra
$p$	Número de variáveis
$P(X_{a1} \leq x_{a1})$	Forma calcula da função probabilidade de avaria
$Q_r(X_r)$	Caraterística $Q$ no instante $r$ ; estatística da carta <i>short run</i> univariada
$Q_t$	Característica da carta <i>short run</i> para o instante $t$
$S$	Matriz das covariâncias da amostra
$S^{-1}$	Matriz inversa das covariâncias da amostra
$S_{r-1}$	Desvio padrão de $(r-1)$
$S_t$	Desvio padrão em $t$
$\overline{R}$	Amplitude da amostra
$R_t$	Amplitude dos resíduos em $t$
$R(\Delta\tau)$	Fiabilidade para $\Delta\tau$
$R(\tau_1, \tau_2)$	Fiabilidade para o intervalo $[\tau_2; \tau_1]$
$t$	Tempo de falha associado
$T^2$	Carta de controlo tradicional de <i>Hotteling</i> $T^2$
$T_i^2$	Estatística da carta <i>MEWMA</i> ; Estatística da carta <i>MEWMAQ</i>
$T_L$	Limite de um parâmetro de equipamento
$(T_L)_N$	Limite do equipamento dado por normativo
$(T_L)_{r-1}$	Limite de vibração considerando $(T_L)_r = (T_L)_N - 3\sigma_{r-1}$ para a observação número $(r-1)$
$T_t$	Estatística da carta <i>CUSUM</i> para os mínimos; Estatística da carta <i>CUSUMQ</i> para os mínimos
$Var(X)$	Variância de $X$
$X$	Observação individual
$\overline{X}$	Média da amostra
$\hat{X}_i$	Valor estimado de $X$ no instante $i$
$X_r$	Observação da caraterística $X$ no instante $r$
$x_{ij}$	Observação $j$ da amostra $i$
$X_k$	Vetor média para as $p$ médias de amostras para o instante $k$
$X_{max}$	$X$ máximo para cálculo da amplitude
$X_{min}$	$X$ mínimo para cálculo da amplitude
$X_r$	Observação no instante $r$
$x_{RMS}$	Observação <i>Root Mean Square</i>

$X_t$	Observação $X$ no instante $t$
$\hat{X}_t$	Valor esperado no período $t$
$Y^*$	Estatística da carta <i>MCUSUM</i>
$Y_0$	Auto-covariância de desfasamento $k=0$ ou variância de $X$
$Y_k$	Auto-covariância de desfasamento $k$
$Y_t$	Valor da variável $Y$ no instante $t$
$Y_t^*$	Estatística da carta <i>MCUSUMQ</i>
$Z$	Vetor linha das $K$ covariáveis
$z_0$	Normal reduzida
$Z_t$	Variável normal reduzida
$\alpha$	Nível de significância
$\alpha_i$	Risco do tipo I para a variável $i$
$\beta$	Vetor coluna dos $K$ parâmetros de regressão. Parâmetro de forma no modelo de Crow-AMSAA
$\beta_{\alpha;p/2;(m-p-1)/2}$	Percentil à direita, para uma probabilidade $\alpha$ , da distribuição Beta com os parâmetros $p/2$
$\gamma_0$	$Var(X)$
$\Delta$	Alteração na média de um processo
$\delta$	Alteração ao desvio padrão para variação da média
$\varepsilon_t$	Erro ou resíduo no instante $t$ ; Ruído branco no instante $t$ ( $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ )
$\theta_j$	Parâmetro de ordem $j$ do modelo <i>MA</i> ou <i>ARMA</i>
$\hat{\theta}_j$	Valor estimado do parâmetro de ordem $j$ do modelo <i>MA</i> ou <i>ARMA</i>
$\theta_q(B)$	Polinomial de médias móveis de ordem $p$
$\lambda$	Parâmetro de escala; constante de amortecimento. Taxa de avarias de um <i>PPH</i>
$\lambda(\tau)$	Derivada do número esperado de avarias
$\rho_j$	Coefficiente de correlação de desfasamento (Lag), $j$
$\rho_k$	Coefficiente de auto-correlação
$\rho(t)$	Taxa de ocorrência de avaria
$\sigma$	Desvio padrão
$\sigma^2$	Variância do processo
$\sigma_E^2$	Variância da variável $E$
$\sigma_\varepsilon^2$	Variância do erro, $\varepsilon$
$\hat{\sigma}_\varepsilon$	Desvio padrão do erro estimado
$\sigma_{\bar{X}}$	Desvio padrão da distribuição de médias de amostras
$\Sigma$	Matriz das covariâncias

$\mu$	Média estimada
$\mu'$	Vetor média
$\xi$	Parâmetro para determinação da média do processo de um modelo $AR(p)$
$\Phi^{-1}(\bullet)$	Inverso da Função de Distribuição Normal
$\phi_j$	Parâmetro de ordem $j$ no modelo $AR$ ou $ARMA$
$\hat{\phi}_j$	Valor estimado do parâmetro de ordem $j$ no modelo $AR$ ou $ARMA$
$\phi_{kk}$	Coefficiente de auto-correlação de ordem $k$
$\Phi_p(B)$	Polinomial auto-regressivo de ordem $p$
$\chi^2$	Estatística do Qui-Quadrado. Carta de controlo tradicional de $\chi^2$
$\nabla$	Operador de diferenças

---

---

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

---

---

*“Importância das machinas para a sociedade. As machinas, pondo à disposição da humanidade o consenso dos agentes naturaes, teem exercido uma grande e benéfica influencia na civilização dos povos, e constituindo um dos seus mais poderosos instrumentos de progresso.”(Marinha-EN, 1904)*



# CAPÍTULO 1

## *1.1. Enquadramento da Dissertação*

## *1.2. Objetivos da Dissertação*

## *1.3. Aplicação dos Métodos Desenvolvidos*

## *1.4. Organização da Dissertação*

### **1.1 Enquadramento da Dissertação**

As questões que deram origem à presente dissertação foram as seguintes:

Na organização onde foi realizada a presente investigação existe um Sistema de Gestão da Manutenção que permite a definição de políticas de manutenção diferenciadas para os diversos sistemas e equipamentos. Face à relativamente fraca incidência das políticas de manutenção condicionada baseadas na monitorização contínua dos equipamentos, decidiu-se proceder a uma investigação em que se pretende estudar a possibilidade de realizar a monitorização contínua de certos equipamentos selecionados baseada em cartas de controlo, criando assim uma base para a intensificação daquele tipo de políticas.

Daí a Questão Central desta tese:

QC – Podem as cartas de controlo ser aplicadas à monitorização de equipamentos de meios navais?

Face o propósito acima referido, as questões derivadas da questão principal e às quais se procura responder através desta investigação são as seguintes:

QD1 – Como é efetuada atualmente a manutenção nos navios da organização onde foi realizado este estudo, e como mudá-la de forma a intensificar o uso de políticas de manutenção baseadas na monitorização contínua de certos equipamentos selecionados?

QD2 – Como implementar a monitorização *online* dos equipamentos baseada nas cartas de controlo?

QD3 – Podem sensores fixos, usados para a medição de vibração e outros parâmetros de funcionamento dos equipamentos, permitir uma monitorização *online* fidedigna?

Relativamente à primeira questão derivada, pretende-se verificar, especificamente qual o tipo de manutenção atualmente aplicada aos navios da organização, e quais os meios e métodos a utilizar de forma a melhorá-la aumentando o número de equipamentos com manutenção condicionada assente na respetiva monitorização contínua de certas variáveis.

Em relação à segunda questão derivada, caso se constate a aplicabilidade das cartas de controlo, deve ser testada a respetiva implementação nos equipamentos, procedendo a eventuais

modificações dessas cartas por forma a dotá-las de boa capacidade de deteção de avarias incipientes e outros eventos relevantes para o processo de decisão.

Em relação à terceira questão, pretende-se verificar se se pode confiar nos sensores para o controlo de vibrações e outros parâmetros de funcionamento.

As hipóteses a investigar são, pois, as seguintes:

- Hipótese 1 – A manutenção na organização obedece a um sistema de manutenção planeada *offline*. É possível e positivo mudar o atual sistema implementado para uma manutenção baseada na monitorização *online*.
- Hipótese 2 – É possível utilizar as cartas de controlo modificadas e desenvolvidas nesta tese a equipamentos em meios navais.
- Hipótese 3 – É possível desenvolver uma metodologia de utilização das cartas modificadas e integrá-las num sistema de manutenção de monitorização *online*, utilizando sensores fixos.

Embora as hipóteses formuladas não apresentem o carácter formal que se espera de hipóteses científicas formuladas em termos estatísticos – visto o grau de formalização do domínio em que decorre esta investigação – a gestão da manutenção de uma frota de navios – não seja ainda muito elevado, julgou-se, ainda assim, útil a sua formulação, fixando as linhas gerais deste trabalho.

Assim, a primeira propõe a questão da alteração do sistema de monitorização *offline* para um *online*. A segunda coloca-se como hipótese que as cartas de controlo são aplicáveis na monitorização de equipamentos, desde que sujeitas a uma modificação nos valores e parâmetros considerados. Na terceira hipótese considera-se que a utilização dos dados de sensores fixos na monitorização de equipamentos *online* é possível e fidedigna.

## 1.2. Objetivos da Dissertação

O principal objetivo desta dissertação é mostrar que as cartas de controlo modificadas univariadas e multivariadas podem ser utilizadas como ferramentas estatísticas de monitorização da condição de equipamentos *online*, em que é possível o diagnóstico e predição de falhas mecânicas. A validação desta metodologia será efetuada e fundamentada com base em dados experimentais recolhidos de um equipamento que servirá como protótipo, de dados observacionais recolhidos de equipamentos em condições reais de funcionamento, designadamente turbinas a gás e motores *diesel* propulsores, usando-se ainda dados simulados em situações de escassez ou impossibilidade de aceder a dados reais. Serão consideradas e estudadas diversas variáveis mas, a principal variável utilizada para verificar o estado de condição do protótipo e das turbinas a gás, está relacionada com as vibrações mecânicas.

São escassas as publicações onde as cartas de controlo aplicadas a equipamentos tenham sido utilizadas. Assim, esta dissertação procura aprofundar, algumas publicações anteriores (Dias *et al*, 2009) e, sobretudo, dar continuidade a uma Tese de Mestrado de Barbosa (2012).

A metodologia desenvolvida, se aplicável, seria de extrema importância porque, ao permitir a monitorização *online* de equipamentos navais, poderia ser também aplicada a meios terrestres e aéreos.

Para se atingir o objetivo da monitorização *online* é definida uma metodologia que passa pela escolha dos equipamentos a monitorizar, definição dos parâmetros envolvidos, definição dos limites a considerar, estudo dos dados recolhidos, definição dos valores normais de funcionamento do equipamento, aplicação das cartas de controlo modificadas e a criação de regras para atuação de acordo com a sensibilidade das cartas.

A aplicação desta metodologia seria de enorme relevância porque poderá eventualmente permitir diminuir os custos de manutenção e de operação dos sistemas libertando recursos para outros usos.

### **1.3. Aplicação dos Métodos Desenvolvidos**

Nesta dissertação será proposta uma metodologia geral que vai agilizar o processo de adaptação dos métodos a cada tipo de equipamento, ao volume de dados disponíveis para cada variável e ao número de variáveis a estudar ao mesmo tempo, considerando um estudo univariado e/ou multivariado.

A metodologia proposta baseia-se, especificamente, no processo de deteção de avarias; no entanto, no Capítulo 4, para além da aplicação das cartas de controlo na deteção, apresenta-se um método de representação gráfica de velocidade e frequência que permite efetuar uma aproximação ao diagnóstico da avaria detetada.

Em síntese, a metodologia proposta, consta da aplicação de cartas de controlo modificadas a equipamentos podendo, o tipo de cartas modificadas, variar em função dos dados disponíveis e do equipamento a monitorizar.

### **1.4. Organização da Dissertação**

No Capítulo 1, Introdução, é apresentada uma breve abordagem aos temas que vão ser desenvolvidos nos capítulos seguintes, bem como as motivações e questões a investigar.

No Capítulo 2 é feita uma descrição da manutenção *offline* e *online*. São apresentadas várias abordagens à manutenção *offline* onde são analisados os vários tipos de manutenção existentes. Uma vez que o bom funcionamento está sempre ligado ao período de funcionamento sem avarias, apresenta-se um breve resumo da teoria da Fiabilidade e de outras técnicas estatísticas que podem ser aplicadas nesta área. Para a manutenção *online* foi desenvolvida uma metodologia para a análise de vibrações caracterizando-se o tipo de avarias que podem ser detetadas com esta técnica.

No Capítulo 3 serão apresentadas as cartas de controlo modificadas para dados univariados e multivariados tanto para amostras de grande dimensão (as cartas de controlo tradicionais e especiais) como para amostras pequenas (as cartas de controlo *short run*). Neste Capítulo serão, ainda, definidas as metodologias para aplicação das várias cartas de controlo em equipamentos.

No Capítulo 4, algumas metodologias desenvolvidas para as amostras de grandes dimensões, são aplicadas a uma eletrobomba. A eletrobomba funcionou como um protótipo e, para validar a metodologia, foram induzidas e testadas avarias que pretendem simular quatro estágios de agravamento. Somente um tipo de avaria vai ser apresentado na dissertação. Pretendeu-se demonstrar a aplicabilidade das cartas de controlo univariadas e multivariadas na deteção atempada destas anomalias.

No Capítulo 5 as cartas *short run* são aplicadas a máquinas propulsoras, turbinas a gás e motores *diesel* onde, se pretende verificar a respetiva adequabilidade ao controlo de vários tipos de variáveis representativas do estado de funcionamento (ex: vibrações, pressões e temperatura). Através de simulação em *MATLAB*, os dados gerados (grande dimensão) serão tratados com as cartas anteriormente descritas. Com esta ação é possível demonstrar que tanto as cartas de controlo *short run* como as outras desenvolvidas no capítulo 3 são aplicáveis aos equipamentos propulsores navais.

Finalmente, no Capítulo 6 será apresentada a conclusão da investigação e o trabalho a desenvolver no futuro, sendo apresentada uma análise final de resultados e as possibilidades de desenvolvimento e derivações da metodologia num futuro próximo.

---

## **CAPÍTULO 2 - MANUTENÇÃO BASEADA NA MONITORIZAÇÃO *OFFLINE & ONLINE***

---

*“Ao passo que os povos que  
desconhecem o uso das machinas  
vivem escravizados pelo  
trabalho,...” (Marinha-EN, 1904)*



## CAPÍTULO 2

### *2.1 Introdução*

### *2.2 Manutenção Baseada em Dados Históricos – Monitorização Offline*

### *2.3 Manutenção Baseada no Estado de Condição – Monitorização Online*

### *2.4 Considerações*

### **2.1 Introdução**

O conceito de manutenção, mesmo que não de forma consciente, surgiu desde que o Homem se dedicou à criação tecnológica. Desde então tem evoluído tornando-se essencial ao bom desempenho de indústrias, de meios navais e de outros ambientes estruturados.

No início do século XX ainda não se falava de vibrações mecânicas e de manutenção como hoje conhecemos, mas já se falava na existência de forças perturbadoras para as máquinas (Marinha-EN, 1904), que estariam na base do início das suas avarias, e por conseguinte na necessidade da sua manutenção.

Foi no período da primeira guerra mundial que a complexidade dos sistemas e equipamentos aumentou e com esse aumento surgiu a necessidade de efetuar o controlo de produção. Foi assim que no período de 1920-1930 surgiram os primeiros controladores de processos e sistemas sendo, então, desenvolvidas as primeiras Cartas de Controlo de Shewhart, iniciando-se o “ciclo” do Controlo Estatístico da Qualidade (Pereira & Requeijo, 2012).

Na segunda guerra mundial, na aviação, surgiram os conceitos de manutenção preventiva, devido à necessidade do desenvolvimento e produção em série de meios aeronáuticos e de os manter, face aos acidentes que se verificavam (Mota, 2009). Neste mesmo período da história, aliado ao conceito de manutenção surgiu o de fiabilidade dos aviões e dos meios bélicos utilizados.

Dias (2002) descreve: “A manutenção é uma atividade realizada sobre um sistema reparável, de tal forma que este desempenhe as suas missões corretamente ou, aumente a sua disponibilidade, fiabilidade e segurança.”

Marinha (1998) enuncia que “A manutenção de meios navais tem como objetivo principal assegurar níveis de disponibilidade do material, compatíveis com os programas de utilização operacional estabelecidos, fazendo uso dos recursos logísticos disponíveis ou passíveis de aquisição com custos aceitáveis.” (Marinha-EMA, 1997) (Marinha, 1998).

O conceito de manutenção e a sua aplicabilidade tem-se vindo a adaptar à realidade dos tempos e à realidade financeira dos responsáveis pelos meios. Sendo certo que uma fração muito importante dos custos do ciclo de vida dos equipamentos é determinada pela manutenção, qualquer otimização

nesta área gera economias marginais importantes. Dado o contexto atual a sua aplicação na área dos meios navais, tanto os militares como os de transporte de passageiros é imperativa que seja efetuada numa filosofia *Lean*. A gestão da manutenção neste tipo de meios tem de responder a um conjunto diversificado de considerações, como por exemplo segurança, fiabilidade, qualidade, e proteção elevada do ambiente, de forma a garantir uma disponibilidade e performance máxima dos equipamentos (Lampreia, 2005).

As necessidades de manutenção de um equipamento podem ser originadas na forma como foi construído, no modo como foi instalado e no modo como é mantido (Institute, 2005). Quando se define uma política de manutenção podemos basear a sua aplicação na gestão do risco. Desta forma os equipamentos monitorizados devem ser, principalmente, os vitais ou selecionados. A estes deve ser aplicado um sistema de apoio à decisão que permita determinar a sua fiabilidade e a tendência para a avaria (Parnell *et al*, 2008).

A forma como se processam os procedimentos de manutenção e reparação dos equipamentos depende das estratégias de manutenção definidas pela organização. Se estivermos perante uma manutenção centralizada, esta fica concentrada no departamento de manutenção sendo este responsável total pelo controlo e manutenção dos sistemas, o que tem algumas vantagens e desvantagens; isto é, há funções que devem ser centralizadas e outras que devem ser descentralizadas. Por exemplo há trabalhos que devem ser realizados a nível local. Estes chamam-se trabalhos de primeiro escalão, em que os utilizadores dos equipamentos ou operários podem efetuar algumas ações de manutenção (Dias, 2002). Esta visão está na linha da *Total Productive Maintenance (TPM)* que será referida à frente neste mesmo capítulo.

Em tempos mais recentes surgiram os conceitos *Lean* e, com estes, o conceito de *Lean Maintenance* onde a redução de desperdícios diminui os custos do processo produtivo, mesmo tratando-se de equipamentos de laboração contínua (Yile *et al*, 2008). O mesmo autor refere ainda o conceito de *Lean Maintenance* sendo sugerido que este tipo de manutenção é proactiva e implica ações planeadas e coordenadas – tal como o *TPM* – utilizando técnicas aplicadas pela *RCM (Reliability Centered Maintenance)*, ações de processos sob conceitos 5S, ou os mais recentes 6S, em que os técnicos da intervenção são multifacetados nas suas ações.

Não obstante, das várias práticas de manutenção no passado e passado recente, considera-se que atualmente a manutenção pode ser dividida em dois tipos de manutenção: a manutenção *offline* e a manutenção *online*. Dentro destes dois tipos enquadra-se o estado da arte que é desenvolvido seguidamente.

## **2.2 Manutenção Baseada em Dados Históricos – Monitorização Offline**

Não há qualidade sem fiabilidade. Isto é, a fiabilidade é um dos atributos da qualidade de um produto, máquina ou serviço, sendo evidente que uma máquina ou serviço que falha frequentemente não merece confiança e portanto não tem qualidade, fato reconhecido por Feigenbaum em 1983 que define “*Qualidade é a correção dos problemas e de suas causas ao longo de toda a série relacionada com marketing, projetos, engenharia, produção e manutenção, que exercem influência sobre a satisfação do usuário.*”.

### **2.2.1 Gestão da Manutenção**

Considerando o conceito de manutenção referido por Dias (2002) em que o principal objetivo é conservar e eventualmente melhorar o potencial duma atividade produtiva de forma a garantir uma boa relação Custo-Fiabilidade, podem ser consideradas várias políticas de manutenção conforme é apresentado na Figura 2.1.

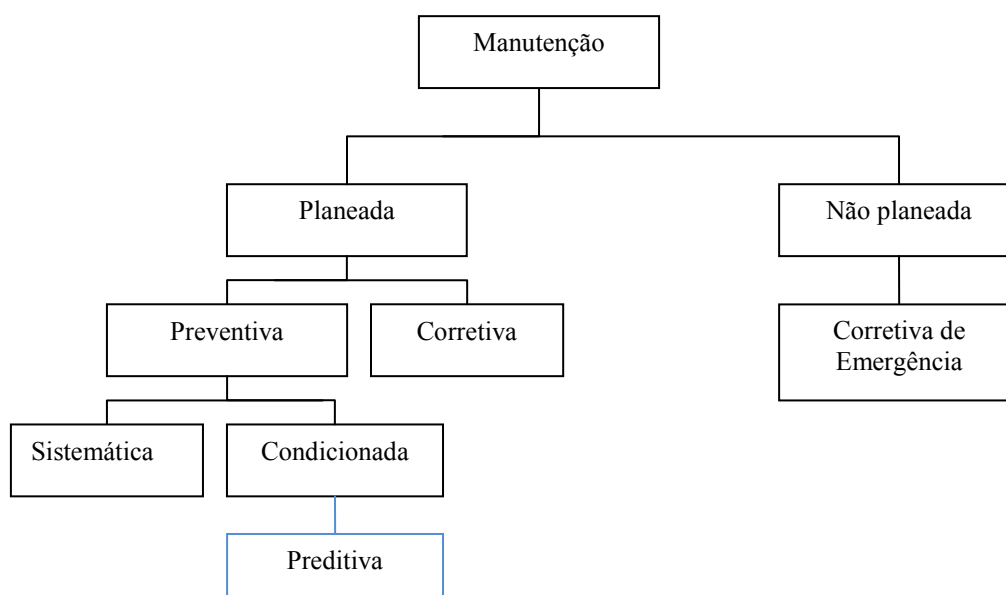


Figura 2.1 Políticas de manutenção (Fonte de: Mota, 2009 e Assis, 1997)

As formas de atuar na manutenção consideradas na figura acima (Figura 2.1) podem assumir diversas definições de acordo com vários autores, no entanto o objetivo geral mantém-se e pode ser descrito conforme se segue:

A **manutenção planeada** é uma manutenção realizada de forma organizada, com coordenação e controlo (Lampreia, 2005).

A **manutenção preventiva** é descrita como sendo a ação de realização de determinados trabalhos planeados de forma a cumprir com as especificidades dos equipamentos e sistemas de forma a manter a sua capacidade funcional (Smith, 1993). Outros autores descrevem ainda como sendo a “manutenção executada em 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.” (Parreira, 2009).

A **manutenção preventiva sistemática** é a manutenção preventiva que obedece a um determinado calendário de intervenção, não existindo necessariamente controlo prévio do estado do equipamento (Parreira, 2009).

A **manutenção preventiva condicionada** é a manutenção efetuada mediante avaliação do estado da máquina, usualmente é efetuada de forma contínua (Assis, 1997).

A **manutenção preditiva** é quando a manutenção condicionada é executada e planeada de acordo com as previsões resultantes da avaliação do estado de degradação de um dado equipamento (Lampreia, 2005).

A **manutenção não planeada** é executada sem planeamento antecipado, na ocorrência inopinada de uma anomalia, pode e deve ter algum tipo de coordenação e gestão, considerando que existem meios de primeira intervenção próximos da área afetada (Lampreia, 2005).

A **manutenção corretiva** é um tipo de manutenção que pode ser planeada ou não planeada. No caso da planeada é porque não existe risco eminente de anomalia, no caso da manutenção não

planeada funciona como sendo de emergência (Smith, 1993), e visa restabelecer uma determinada condição operacional de uma máquina (NP, 2007).

A **manutenção de emergência (ou urgência)** é uma manutenção não planeada e corretiva que é efetuada numa situação de anomalia para evitar consequências catastróficas (NP, 2007).

Mechefske em Silva (2005) refere ainda três estratégias de manutenção: a *Run-to-Failure*, a calendarizada e a manutenção baseada na condição. As duas últimas são respetivamente a planeada sistemática e a manutenção condicionada. Quanto ao tipo de manutenção que se chama *Run-to-Failure (Breakdown)* é somente efetuada quando a máquina avaria e não pode funcionar, o que se traduz na não planeada corretiva de emergência.

No âmbito destes conceitos é importante a definição de Avaria, em que a NP (2007) traduz que avaria é a “Cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida” (NP, 2007). Várias interpretações podem ser efetuadas relativamente a um equipamento em avaria, a mesma norma coloca duas notas, em que uma diz que após a avaria uma máquina pode estar em falha total ou parcial, e outra em que “Avaria” é um acontecimento, e que “em falha “ou “avariado” é um estado” (NP, 2007). Portanto um equipamento com um acontecimento de avaria pode não estar em falha e manter um funcionamento condicionado a um estado de avariado.

A manutibilidade é a “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.” (NP, 2007).

Juran & Junior (1970) definiu vários estágios para análise e predição da fiabilidade na fase de conceção de um equipamento, conforme se apresenta na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Estágios da análise e predição de fiabilidade (Fonte de: Juran & Junior, 1970)

	Início Projeto	Desenvolvimento do Projeto	Final do projeto	Testes do Sistema	Operação no Cliente
Base	Predição baseada nas avarias ou no tempo funcionamento, e no conhecimento dos limites funcionamento.	Predição baseada nas quantidades e tipo de componentes, os seus limites de funcionamento e redundância.	Predição baseada nos tipos e quantidades da taxa de avaria por componentes e o limite dos componentes. Tem ainda em consideração as manutenções praticadas.	Medidas baseadas nos resultados dos testes do sistema completo. Os índices de fiabilidade são calculados com base no número de avarias e no tempo de funcionamento.	Medidas baseadas nos resultados dos testes do sistema completo. Mas os índices de fiabilidade são calculados com base nos dados recolhidos pelo utilizador final de um equipamento.
Usos Primários	Avaliar a viabilidade de corresponder aos requisitos numéricos propostos. Colaborar a estabelecer um objetivo de fiabilidade quando se está a conceber os equipamentos.	Avaliar a fiabilidade total do equipamento. Definir as áreas sensíveis dos equipamentos.	Avaliar a fiabilidade total do equipamento. Definir as áreas sensíveis dos equipamentos.	Avaliar a fiabilidade total do equipamento. Definir as áreas sensíveis dos equipamentos.	Meta de fiabilidade atingida. Definir as áreas sensíveis dos equipamentos. Obter dados para projetos futuros.

Seria interessante e bastante útil, que os parâmetros de funcionamento dos equipamentos que são calculados através da metodologia definida no capítulo 3, fossem definidos durante as fases descritas por Juran & Junior (1970).

O ciclo de vida de uma instalação (Figura 2.2) segundo Nepomuceno (1985) congrega vários fatores. O ciclo apresenta o investimento inicial num sistema ou máquina, após o que se inicia o período de vida útil, em que os sistemas estão sujeitos a fatores internos e externos que degradam o

seu funcionamento e por outro lado são tomadas ações corretivas aos estados de anomalia em que, em determinado ponto, se decide por uma revisão geral ou se opta pela sua substituição. As metodologias que vão ser desenvolvidas nesta tese centram-se à volta do período de vida útil (Figura 2.3), em que de acordo com as anomalias registadas será tomada uma determinada ação (Nepomuceno, 1985).

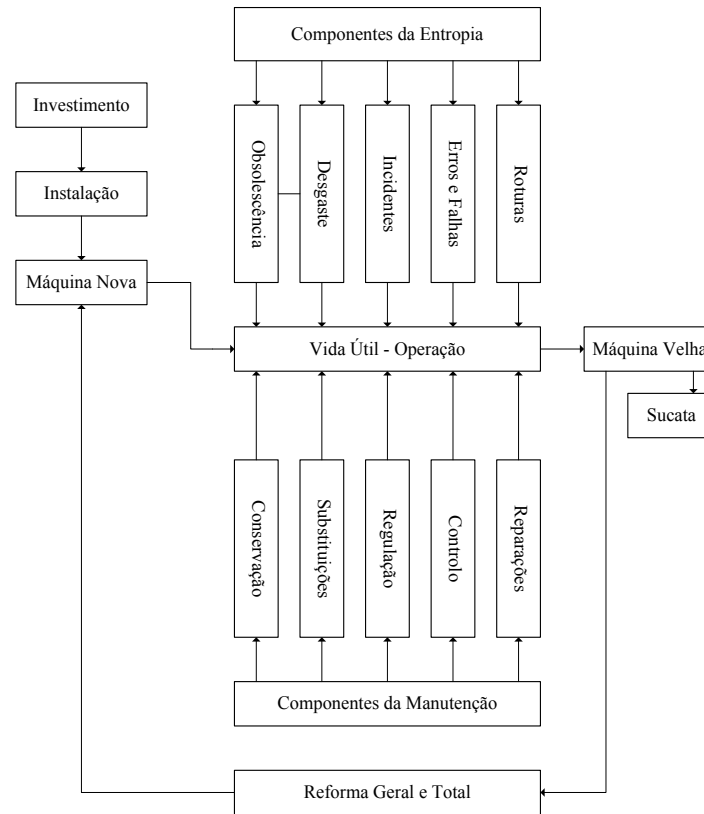


Figura 2.2 Ciclo de uma instalação (Fonte de: Nepomuceno, 1985)

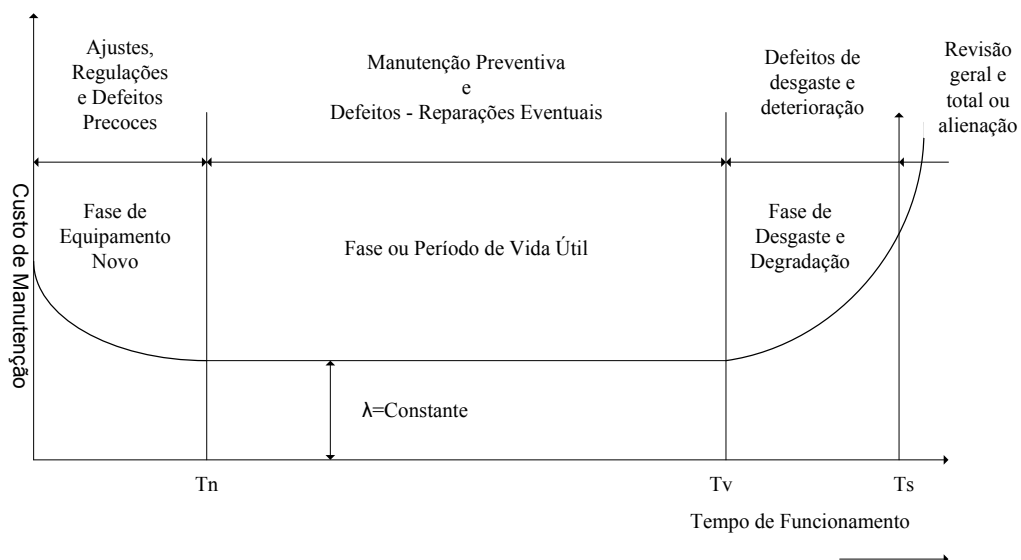


Figura 2.3 Curva da banheira (Fonte de: Nepomuceno, 1985)

Quando, num sistema reparável, se decide aplicar um determinado tipo de manutenção, existem custos a considerar, que geralmente satisfazem uma relação do tipo da representada na Figura 2.4. É de referir que de acordo com Nepomuceno (1985), neste gráfico (Figura 2.4), não estão considerados os custos indiretos, como a energia, com o pessoal e sua segurança.

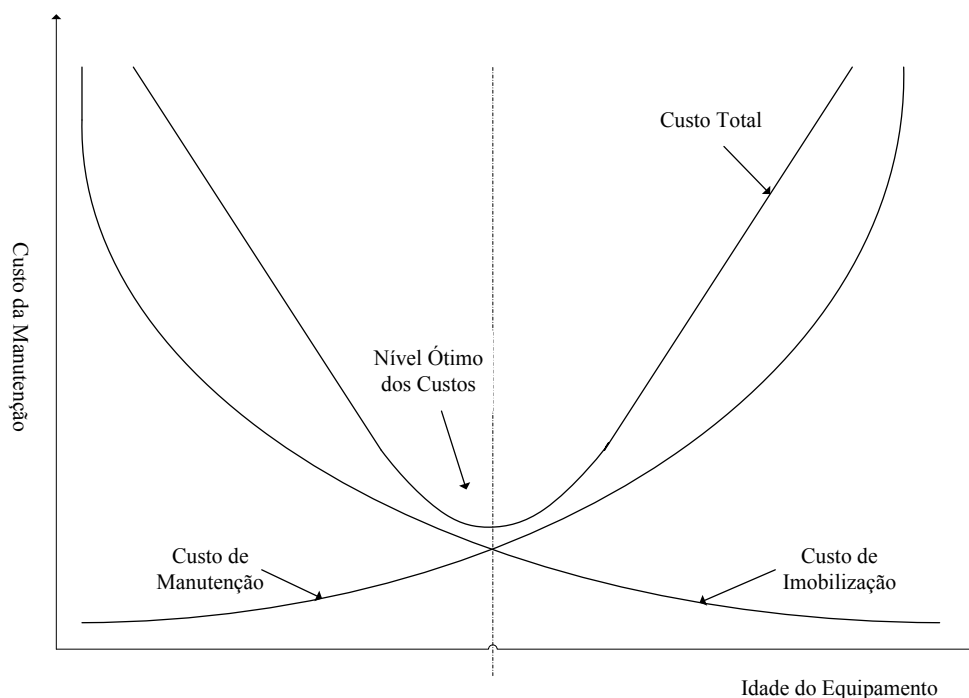


Figura 2.4 Custos de sistemas em função da sua idade (Fonte de: Nepomuceno, 1985)

Como a manutenção tem custos associados aos sistemas reparáveis, dependentes do enquadramento e das capacidades de uma empresa, a manutenção condicionada poderá ser a mais indicada de forma a minimizar eventuais desperdícios.

### 2.2.2 A Manutenção na Organização

A manutenção, na organização onde foi efetuada esta investigação, surgiu com a necessidade de monitorizar o funcionamento dos equipamentos e controlar a operacionalidade dos navios. Com o objetivo de consolidar ações e melhorar os objetivos e tarefas realizadas foram criadas publicações em que se definiram um conjunto de ações a tomar, de forma a conservar o material (Marinha-EMA, 1997) (Marinha, 1998).

Existe na Marinha um *SGM* – Sistema de Gestão da Manutenção, comportando um Sistema de Manutenção Planeada (*SMP*) e um Sistema de Recolha e Tratamento de Dados (*SRTD*). O *SMP* é um conjunto de normas que abrangem as atividades mais importantes de planeamento e organização da atividade de manutenção, incluindo a especificação das políticas de manutenção e o registo de aspetos técnicos associados às ocorrências das intervenções de manutenção planeadas. De entre os documentos normalizados destaca-se as Cartas de Manutenção, em que estão expressas as políticas de manutenção adotadas para os equipamentos selecionados para integrarem o *SMP*. De referir que o *SGM* não manifesta qualquer preferência por qualquer política de manutenção em particular. Essas políticas pressupõem expressar a experiência da organização, incluindo os dados históricos disponíveis mas também outras fontes de informação tal como os fabricantes e normas nacionais e internacionais.

O *SRTD* garante a acumulação de informação histórica e operacional sobre a manutenção, nomeadamente as ocorrências das intervenções (preventivas, corretivas ou de outra natureza) a

descrição dos trabalhos realizados, quem os realizou, onde foram realizados, que sobressalentes e outros materiais foram gastos e, eventualmente, quanto custaram. O objetivo é permitir a definição informada de políticas de manutenção, a avaliação das políticas em vigor e a respetiva alteração quando for caso disso.

Para apoio do SGM, foi criado um sistema informático - SICALN - que inclui bases de dados relacionais para gerir toda a informação, tanto do SMP como do SRTD. De seguida está representado um esquema de funcionamento do SGM/SMP na organização, relacionado com o planeamento da manutenção (Marinha-DN, 1998).

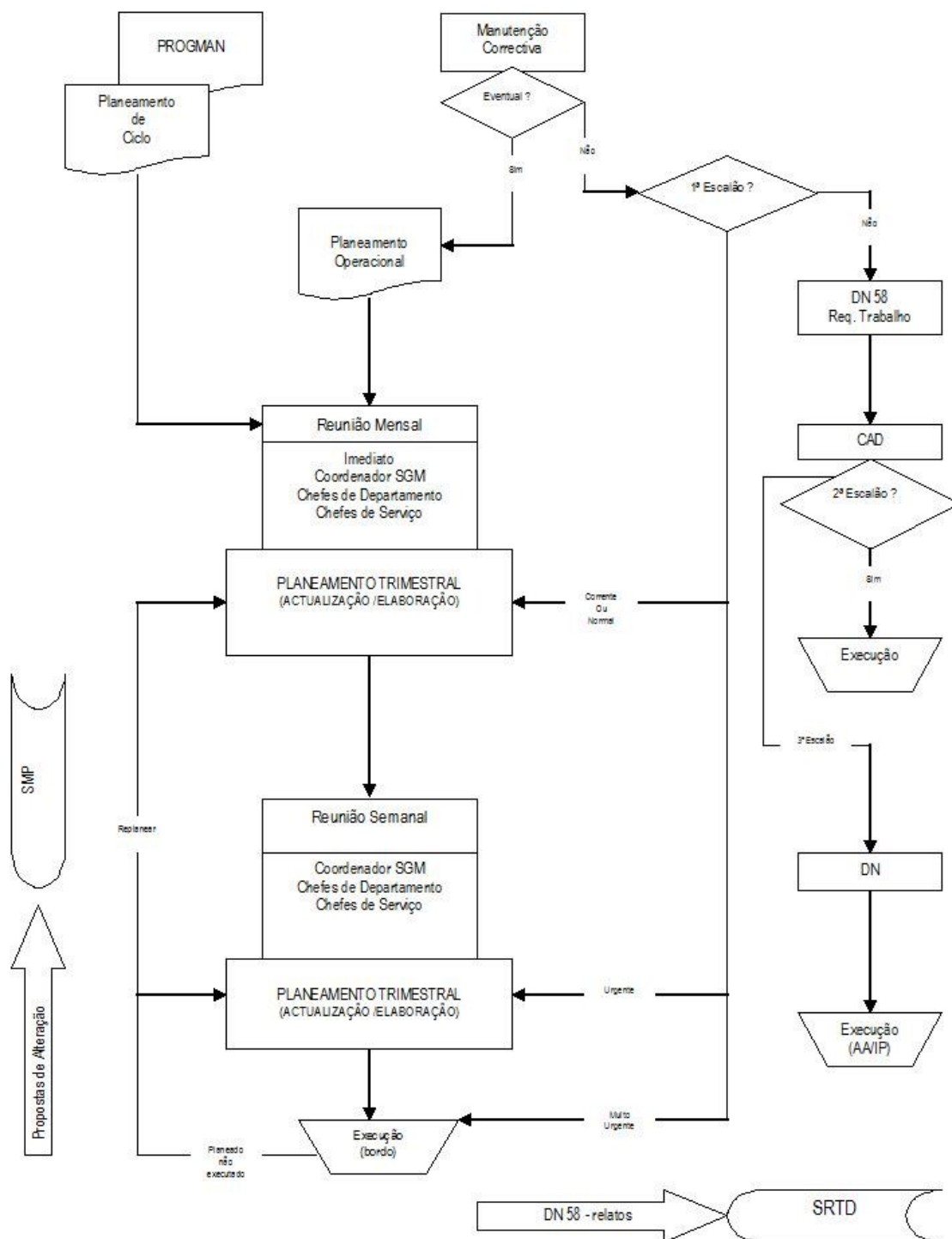


Figura 2.5 Funcionamento do ciclo de planeamento do SGM/SMP (Fonte de: Marinha-DN, 1998)

Embora, como se referiu, o *SGM/SMP* não manifeste preferência por qualquer política de manutenção, é fato que a grande maioria das *CARM* em vigor forçam a implementação de políticas de manutenção sistemática - o que não está de acordo com a percepção atual acerca dos benefícios da manutenção condicionada.

Este tipo de manutenção garante o tratamento *online* dos dados coletados dos equipamentos, fato que deve estar refletido nas *CARM* relevantes. De referir que antes da paragem de um navio para entrada no estaleiro, realizam-se inspeções do tipo dos associados à manutenção condicionada mas não inserido num esquema de monitorização *online*, usando dados insuficientes, podendo originar-se diagnósticos errados acerca do verdadeiro estado da máquina.

Quanto às definições de manutenção preventiva e corretiva são semelhantes às já referidas anteriormente. Relativamente à sua classificação, pode ser uma manutenção do 1º escalão, do 2º escalão e do 3º escalão.

A manutenção do 1º escalão implica trabalhos de retificação e/ou substituição de elementos danificados dos equipamentos, afinações e provas, utilizando os meios, material e pessoal, que estão integrados num navio (Marinha-DN, 1998).

A manutenção do 2º escalão prevê trabalhos que implicam a retificação e/ou substituição de elementos danificados dos equipamentos, afinações e provas, utilizando os meios, material e pessoal, que estão integrados num navio, tal como a utilização das dotações de ferramenta dos meios oficinais terrestres, quer em material quer em pessoal (Marinha-DN, 1998).

A manutenção do 3º escalão, é considerada geralmente complexa e de elevada dimensão, utiliza meios superiores à intervenção do 1º e 2º escalão, e é supervisionado por um organismo técnico hierarquicamente superior (Marinha-DN, 1998).

O *SMP* na organização define a periodicidade das manutenções, o seu nível de intervenção e meios materiais e pessoais a utilizar. É ainda parte integrante do *SGM*, e em termos de manutenção responde a: *O que há a fazer? Quando se executa? Quem é o executante? E como se executa?*

Na realidade o que a organização efetua vai de encontro ao traduzido por Cuignet (2006), em que de fato a gestão da manutenção existe e são controlados todos os processos que ocorrem neste âmbito. Sendo estes executados em vários graus de escalões de intervenção. Mas no entanto não efetua uma monitorização *online*.

### **2.2.2.1 Sistemas de Recolha e Tratamento de Dados**

O outro componente do *SGM* é o *SRTD*, já atrás mencionado, atualmente apoiado pelos componentes relevantes do *SICALN*. Inicialmente os dados eram recolhidos através de impressos em papel: *DSM58*- para requisitar relatar intervenções de qualquer natureza (preventiva, corretiva ou outra) realizados no material- o quê, quando, onde, porquê, quem; o impresso *DSM60* para registar o consumo de sobressalentes, imputando estes consumos às intervenções e o impresso *DSM59* para registo sistemático de horas de funcionamento, consumos de combustível e óleo de alguns equipamentos selecionados, bem como tempos de imobilização do navio no período respetivo e horas de navegação realizadas (Marinha-DN, 1984). Posteriormente, com o desenvolvimento do sistema informático *SICALN*, estes impressos foram substituídos por procedimentos de registo numa base de dados, diretamente a partir dos navios. Contudo, os dados recolhidos por este sistema não vão ser considerados para a aplicação estatística desta dissertação, embora vão servir para confirmar alguns resultados obtidos, nomeadamente na área da investigação das vibrações nas turbinas a gás.

O sistema de recolha e tratamento de dados da organização poderia ser reorientado de futuro e obedecer mais fielmente ao descrito por exemplo nas normas *MIMOSA* (*Machinery Information Management Open Standards Alliance*), de forma a contribuir para uma manutenção *online* efetiva.

### **Data Warehouse Methods**

Tem sido referida a recolha de dados, mas que na realidade funcionam como uma acumulação de informação. Estes geralmente são colocados em formato “*no user friendly*”, para quem quer decidir um tipo de manutenção que seja aplicável a uma dada situação. Assim, para transformar a informação em dados é necessário obedecer a algumas regras de armazenamento de forma a adquirirem um formato em que possam ser utilizados. Assim, porque informação só por si não é útil, o que se quer são os dados dessa informação. A *MIMOSA* estabelece e padroniza normas para organizar uma base de dados. Para implementar uma tabela com uma determinada arquitetura, por exemplo num sistema de gestão dum sistema integrado de saúde (*ISHM*) (Walter, 2006), deve ser construído um sistema de comando e controlo, onde as operações devem ser monitorizadas. No caso de equipamentos serve igualmente, mas para acompanhar a condição dos equipamentos, calculando a sua fiabilidade e implementando um sistema de prevenção de eventuais danos. É de referir que ISO-13374 (2003), estabelece as condições para monitorização e diagnóstico de máquinas.

Pereira (2011) define algumas etapas para criação da base de dados de manutenção condicionada:



Figura 2.6 Etapas da criação da base de dados (Adaptado de: Pereira, 2011)

De uma forma geral também estas etapas são utilizadas na dissertação.

Vários estágios podem ser definidos na monitorização da condição num sistema *MIMOSA* (Simeón, 2008):

- Aquisição de dados;
- Manipulação de dados;
- Detecção do estado;
- Avaliação da saúde do sistema;
- Acesso ao prognóstico;
- Geração provisória de ações a tomar.

Estes estágios vão de encontro ao definido por alguns dos autores já referidos anteriormente, e são também aqueles que na organização são utilizados, embora possam ser melhorados.

Esta investigação estará centrada na monitorização da condição e diagnóstico de equipamentos navais.

### 2.2.2.2 Vibrações Offline na Organização

Entre outros projetos e métodos desenvolvidos, em 1998, o projeto *MANPRED*, na Organização em que foi efetuada a investigação, definiu a localização de vários pontos de medida de vibração em equipamentos de navios. As medidas de vibração têm sido registadas mas somente quando existe suspeita de avaria ou antes e depois de uma manutenção profunda nos meios navais.

Para as turbinas a gás de uma classe de navios existente, apresenta-se na Tabela 2.2 os pontos que foram definidos para registo de vibrações.

Tabela 2.2 Pontos de medida definidos para turbinas a gás (Fonte de: Marinha, 1998a)

Equipamento	Pontos de Medida	Marca	Direção	Obs.
Turbina a Gás de EB	– Monitorização do Gerador de Gases (Vibração Própria)	A	V	TF1
	– Monitorização do Gerador de Gases (Vibração Induzida)	A	V	TF2
	– Monitorização da turbina de Potência (Vibração Própria)	B	V	TF3
	– Monitorização da turbina de Potência (Vibração Induzida)	B	V	TF4
	– Bucim de passagem entre as casas de máquinas	C	H, A	
Turbina a Gás de BB	– Monitorização do Gerador de Gases (Vibração Própria)	A	V	TF1
	– Monitorização do Gerador de Gases (Vibração Induzida)	A	V	TF2
	– Monitorização da turbina de Potência (Vibração Própria)	B	V	TF3
	– Monitorização da turbina de Potência (Vibração Induzida)	B	V	TF4
	– Bucim de passagem entre as casas de máquinas	C	H, A	

Nesta altura, o regime de funcionamento das turbinas escolhido para as leituras foi conforme o definido na Tabela 2.3 (Marinha-DN, 1998a).

Tabela 2.3 Características das medidas das turbinas a gás (Fonte de: Marinha, 1998a)

Equipamento	Tipo de medida	Regime Potência	Regime Rotação	Obs.
Turbina a Gás de EB	Valor global de velocidade (RMS)	80%	8921/3224 rpm	% propulsion system total power
Turbina a Gás de BB	Valor global de velocidade (RMS)	80%	8921/3224 rpm	% propulsion system total power

### 2.2.3 Metodologias de Manutenção - Controlo de Condição

A manutenção condicionada veio complementar e substituir algumas de outras formas de fazer manutenção, e quando integrada num sistema de manutenção permite, não só detetar anomalias atempadamente como eliminar as suas causas, reduzindo o número de avarias abruptas e melhorando o planeamento das intervenções (Castro *et al*, 1999).

As suas vantagens podem ser as seguintes:

- Evitar manutenções que não são necessárias através do acompanhamento de condição, o que permite planear as manutenções quando existe um forte indicador de avaria (Jardine, 1997);
- Redução das perdas por produção numa indústria (Institute, 2005);
- Aumento do tempo de vida dos equipamentos (Lampreia, 2005);
- Evita *stocks* desnecessários (Mechefske, 2005);
- Aumenta segurança, a qualidade e satisfação dos clientes ou operadores finais (Lampreia, 2005).

De referir que a manutenção condicionada não é por si só o garante de resultados positivos, pois o seu sucesso depende das ações desencadeadas e da sua conjugação (Lampreia, 2005).

As variáveis que geralmente interessam acompanhar por parte da manutenção preventiva, dependendo do sistema ou equipamento que estamos a falar, são (Nepomuceno, 1985):

- A espessura do material;
- A temperatura da operação;
- A ventilação;
- O grau de partículas na entrada e/ou na saída;
- A vibração do equipamento: deslocamento, velocidade e aceleração;
- A contaminação do lubrificante ou isolante;
- As fissuras por fadiga;
- Outras.

### 2.2.3.1 Sistemas e Técnicas de Controlo de Condição

Quando falamos em controlo de condição temos que falar de registo histórico, de forma a poder monitorizar não só os parâmetros de funcionamento, como o consumo de sobressalentes. Estes dados devem ser organizados de forma cronológica.

A nível do controlo de condição de equipamentos e sistemas existem várias técnicas e métodos de controlo e monitorização do estado dos equipamentos. Como a maior parte dos equipamentos da indústria são mecânicos e rotativos, a medição de vibrações é geralmente a técnica mais utilizada na maior parte dos programas de manutenção, esta técnica será desenvolvida no ponto 2.3.1 deste Capítulo. A medição e análise de vibrações permitem uma monitorização mecânica do equipamento mas, se por exemplo, se tratar de um problema no óleo de lubrificação será necessário utilizar outro tipo de ensaio para determinar eventuais anomalias. De forma a utilizar os métodos complementares de diagnóstico podem ser utilizadas outras metodologias para potenciar o rendimento e fiabilidade das instalações (Lampreia, 2005).

Tabela 2.4 Ensaio não destrutivos (Fonte de: Nepomuceno, 1985)

Ensaio Visuais ou Exame Visual	
Exame visual complementar Controlo dimensional Boroscopia	
Processos eletromagnéticos	
Ensaio com correntes parasíticas ( <i>Eddy Current</i> ) Ensaio com partículas magnéticas (ou magnetizáveis) Ensaio pela perturbação do campo magnético Ensaio pela perturbação do campo elétrico Ensaio por ressonância magnética	
Ensaio por radiação penetrante	
Ensaio com raios X Ensaio com raios gama Ensaio com neutrons ( <i>Neutron Radiography</i> )	
Ensaio com energia sónica	
Ensaio ultrassónicos Ensaio por emissão acústica Ensaio por análise Tonal ( <i>Tonanalyse, Tonal Analysis</i> )	
Ensaio com vazamento	Ensaio termográficos
Ensaio com líquidos penetrantes	Parâmetros processuais
Análises a Fluidos	

Assim, em termos de Ensaios não destrutivos (Nepomuceno, 1985) podem ser utilizados os contantes na Tabela 2.4.

Dos ensaios não-destrutivos, o mais vulgarmente utilizado é o exame visual (Sena, 2013) e a audição de eventual ruído, ambos estiveram sempre presentes durante a investigação. Nesta tese só a vibração será abordada de forma extensiva.

Quando decidimos aplicar a manutenção condicionada a um equipamento marítimo através da análise de vibrações, é porque já decidimos que este é o método aplicável, técnica e financeiramente, ao tipo de equipamento em estudo. A recolha deste tipo de dados em navios foi descentralizada e simplificada mas, o seu tratamento, deve ser centralizado num coordenador local (Castro *et al*, 1999). Na organização em que se efetuou a investigação os dados dos navios estão centralizados numa Direção de Manutenção, mas não são analisados *online* e nem de forma sistemática. A centralização e análise é atualmente efetuada por esta direção técnica, de forma em caso de suspeita de anomalia, perceber a sua eventual tendência.

Desta forma, para equipamentos críticos, a monitorização que deve ser sistemática e contínua. Para cada equipamento a estratégia de manutenção, mesmo com base em vibrações, pode e deve ser diferente. Os fatores que influenciam a escolha da estratégia são (Mechefske, 2005):

- Classificação (tamanho e o tipo) da máquina;
- Custo de substituição de toda a máquina;
- Tempo de substituição da máquina;
- A criticidade da máquina relativamente à operacionalidade de um sistema;
- As recomendações do fabricante;
- A redundância;
- O registo e modo de avarias;
- A segurança pessoal, material e ambiente.

Assim, consoante a sua criticidade, complexidade, custo e exigência do fabricante e operador pode variar a periodicidade das medidas de sensores e o número de pontos a monitorizar.

Al-Najjar & Alsayouf (2003) evidenciam a importância da gestão dos ativos a nível industrial e utilizam o modo de avaria “vibração” de forma a efetuar uma análise da performance dos equipamentos contribuindo para a diminuição dos custos de manutenção. Pode ser dito que de fato esta é uma técnica de monitorização utilizada em vários ambientes tecnológicos e onde se obtém resultados fidedignos relativamente ao estado dos equipamentos.

#### **2.2.4 Sistemas Reparáveis**

Um sistema reparável (*SR*), ou um bem reparável, é “*Um bem que, depois de uma avaria e sob determinadas condições, pode ser reposto num estado em que poderá desempenhar a função requerida.*” (NP, 2007).

Um dos aspetos cruciais na manutenção dos Sistemas Reparáveis, reside na pouca colaboração que existe a execução técnica que se prende com a realização física da reparação dos sistemas avariados e a utilização de técnicas estatísticas a utilizar na Gestão da Manutenção que parecem ser mais relevantes na Manutenção que em qualquer outra atividade. Na prática é vulgar o senso comum para programar a manutenção, enquanto os investigadores impõem determinados pressupostos à sua programação que nem sempre são possíveis no mundo real (Ascher e Feingold, 1984).

Para analisar um *SR*, numa perspetiva de desempenho é fundamental considerar a ordem cronológica de todas as avarias. Só a ordem cronológica, do processo estocástico de avaria, vai permitir fazer uma análise crítica do comportamento global do sistema. Considerando que o *SR* é

constituído por um ou mais componentes (Figura 2.7), a sequência de avarias indicada pode ser devida à avaria de um mesmo componente ou de componentes distintos.

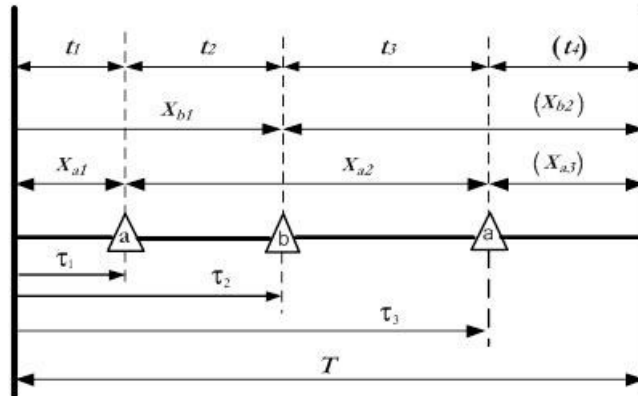


Figura 2.7 Exemplo de um Sistema Reparável (Fonte de: Dias, 2002)

Para a primeira avaria ter-se-ia, por exemplo, uma função de probabilidade de avaria  $F_{a1}(x) = P(X_{a1} \leq x_{a1})$  dada por  $P(X_{a1} \leq x_{a1}) = \int_0^{x_{a1}} f_{a1}(u) du$  e assim, sucessivamente, para as restantes avarias. Ter-se-á assim um conjunto de variáveis aleatórias distintas: idade do sistema no momento da avaria ( $\tau$ ) e tempo desde a última avaria ( $X$ ) o qual depende da função de probabilidade que modela o tempo de vida do componente que avaria na posição  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n_f$ ). Assim, de acordo com o já referido, estas variáveis aleatórias,  $X_a, X_b, \dots$ , estão ordenadas cronologicamente. A variável  $t$  mede o tempo decorrido desde a última avaria. Considerando, de acordo com o atrás indicado, as várias variáveis envolvidas sobretudo a idade do sistema no momento da avaria, será possível fazer uma avaliação correta dos dados históricos do SR. (Dias, 2002)

O teste de Laplace permite fazer a distinção entre um Processo de Poisson Homogéneo (PPH) e a existência de tendência monótona.

No pressuposto de um PPH, os,  $n_f$ , tempos desde a última avaria no sistema,  $t_1, t_2, \dots, t_{n_f}$ , são a ordem estatística de uma distribuição uniforme.

Para um teste limitado por tempo ( $T$ ), a estatística

$$z_0 = \sqrt{12 \cdot n_f} \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n_f} \tau_i}{T \cdot n_f} - 0,5 \right] \tag{2.1}$$

é, para  $n_f \geq 4$ , uma variável Normal reduzida. A hipótese nula,  $H_0$ , ou seja a hipótese de se estar a tender para um Processo de Poisson Homogéneo será rejeitada se  $z_0$  for superior ao valor crítico para um determinado nível de significância.

Um Processo de Poisson, consiste numa sequência de ocorrências de avarias de um SR, durante o seu período de funcionamento. Considerando que o valor esperado do número de avarias ( $E[N(\tau)]$ ) é absolutamente contínuo, a sua derivada será:

$$\lambda(\tau) = \frac{dE[N(\tau)]}{d\tau} \tag{2.2}$$

Onde,  $N(\tau)$  representa o número de avarias que ocorrem durante o intervalo  $(0, \tau)$ .  $\{N(\tau), \tau \geq 0\}$  e são a ordem discreta dos valores do processo estocástico que incluem o número de avarias,  $N(\tau)$ , e os respetivos instantes,  $\tau_1, \tau_2, \dots$ , em que elas ocorrem. O valor de  $\lambda(\tau)$  constitui a variação esperada da taxa de avarias ao longo do tempo ou taxa de ocorrência de avarias (*ROCOF – Rate of Occurrence of Failures*). A Taxa de Falhas ou de Avarias é um valor absoluto e nunca deve ser confundida com a função de risco,  $h(x)$ , que é um valor relativo característico da distribuição estatística que modela o tempo de vida de um componente.

Em aplicações práticas é normal considerar apenas o teste de Laplace (Ascher e Feingold, 1984) para analisar o comportamento das avarias, permitindo verificar se a taxa de avarias é constante ou se, pelo contrário, apresenta alguma tendência. Desta forma, com os dados ordenados cronologicamente, o teste de Laplace permite concluir se o sistema reparável se comporta como um *PPH* ou se, pelo contrário, segue um *PPNH* (Processo de Poisson Não Homogéneo), para um determinado nível de significância. Valores negativos de  $z_0$ , fora do intervalo de confiança, indicam a presença de *PPNH* com taxa de avarias decrescente, enquanto valores positivos, fora do intervalo, indicam taxas de avarias crescentes (Dias, 2002).

Um Processo de Poisson Homogéneo, num contexto de sistemas reparáveis, é uma sequência aleatória de avarias onde o número de avarias, para qualquer intervalo de tempo  $\tau_2 - \tau_1$ , segue uma distribuição de Poisson com média  $\lambda(\tau_2 - \tau_1)$ . Isto é, para todo  $\tau_2 > \tau_1 > 0$ ,

$$P\{N(\tau_2) - N(\tau_1) = x\} = \frac{e^{-\lambda(\tau_2 - \tau_1)} \cdot [\lambda(\tau_2 - \tau_1)]^x}{x!} \quad (2.3)$$

onde  $\lambda$  é constante e representa a Taxa de Avarias de um *PPH*. Neste caso, a fiabilidade do SR pode ser calculada como a probabilidade de  $x=0$  avarias para um determinado intervalo de tempo. Logo, para o intervalo  $\tau_1, \tau_2$ , a fiabilidade será dada por:

$$R(\tau_1, \tau_2) = e^{-\lambda(\tau_2 - \tau_1)} \quad (2.4)$$

Nestas condições, para um SR com uma idade de  $\tau$  horas, a probabilidade de não avariar nas próximas  $\Delta\tau$  horas é:

$$R(\Delta\tau) = e^{-\lambda \cdot \Delta\tau} \quad (2.5)$$

Para uma taxa de avarias constante, a fiabilidade para o próximo período de utilização ( $\Delta\tau$ ) é independente tempo de vida durante o qual o sistema exibe uma taxa de avarias constante. Neste contexto poder-se-á falar do *MTBF* (*Mean Time Between Failures*) do sistema como sendo o inverso da taxa de avarias (Dias, 2002).

Em termos práticos de manutenção, a substituição preventiva de componentes, num sistema que apresenta uma taxa de avarias constante (nem sempre é recomendável. De fato, um sistema com uma taxa de avarias constante, não beneficia com a substituição preventiva de componentes com função de risco constante. Neste caso apenas os componentes com função de risco crescente devem ser substituídos preventivamente.

Os Processos de Poisson não Homogéneos, como o próprio nome sugere, são aqueles em que a Taxa de Avarias é variável ao longo do tempo. Assim, o número esperado de avarias para um determinado intervalo valerá:

$$E\{N(\tau_2) - N(\tau_1)\} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \lambda(u) du \quad (2.6)$$

e, consequentemente, de acordo com as expressões (2.4) e (2.6) a fiabilidade será dada por:

$$R(\tau_1, \tau_2) = e^{-\int_{\tau_1}^{\tau_2} \lambda(u) du} \quad (2.7)$$

Nesta situação estar-se-á em presença de uma sequência não aleatória de avarias o que significa que os tempos desde a última avaria podem apresentar tendência para diminuir ou aumentar ao longo do tempo, correspondendo, respetivamente, a um *SR* com uma Taxa crescente ou decrescente (Dias, 2002).

#### **2.2.4.1 Algumas Metodologias Utilizadas em Manutenção de Sistemas Reparáveis**

Todas as técnicas e metodologias de manutenção que possamos querer aplicar a uma máquina visam a deteção de avarias. O desenvolvimento do *CBM* (*Condition Based Maintenance*) / *PHM* (*Prognostics and Health Management*) normalmente pressupõe que seja definida nas avarias (ex: mecânicas) uma percentagem específica daquilo que pretendemos detetar. Esta percentagem deve ser identificada através do *RCM* e do *FMECA* (Vachtsevanos, 2006). No presente caso este princípio aplica-se uma vez que vamos definir limites e regras para deteção e intervenção (Capítulo 3).

A *RCM* (*Reliability Centered Maintenance*) teve a sua origem nos anos 50, na área da aeronáutica, pois os custos de manutenção encontravam-se num nível muito elevado. Neste método, a manutenção é organizada de acordo com o cálculo de fiabilidade de um equipamento ou sistema (Leite, 1998).

O *TPM* (*Total Productive Maintenance*) pode ser aplicada a sistemas onde são efetuadas inspeções, rondas programadas e limpeza aos equipamentos. Nos anos 80 esta metodologia veio permitir uma redução dos custos de produção e manutenção em que, através do envolvimento de todos, o desperdício foi reduzido ao mínimo (Tsang & Chan, 2000) e os *stock's* eram praticamente zero. Há alguns anos que se verifica esta prática nas empresas de maior prestígio, como é o caso da Autoeuropa em Portugal.

Verificando os conceitos, *RCM* e *TPM*, verifica-se que são métodos pertencentes a uma política de manutenção de uma organização. Leite, 1998) (Lampreia, 2005). Podem eventualmente ultrapassar as fronteiras de ambos para contribuir para uma manutenção *Lean*, em que o compromisso com a melhoria contínua impera.

#### **Noção de Fiabilidade**

A fiabilidade é “a aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo.” (NP, 2007).

A determinação da fiabilidade de equipamentos é fundamental à boa gestão de ativos seja em equipamentos navais, terrestres ou aéreos, de forma à sua operação ser maximizada, a disponibilidade e performance sejam máximas a um custo mínimo.

Na análise de fiabilidade em manutenção, várias técnicas estatísticas e métodos podem ser utilizados. Quando, após a deteção dos componentes mais críticos, for possível a sua modelação deve ser utilizada a função distribuição de Weibull. Esta função permite um ajustamento aos dados da função de distribuição do tempo de vida mais adequado permitindo efetuar a previsão da avaria de um determinado sistema (Dias, 2002).

Pereira (1996) refere o modelo de riscos proporcionais como método de acompanhamento de condição de equipamentos, este é um modelo exponencial que vai permitir analisar vários

parâmetros e a sua implicação na função de risco. Para concretizar o controlo de condição, Pereira associa um modelo de regressão de modo a estimar a influência das variáveis características do processo de avaria, na função de risco global do equipamento. O modelo apresentado não necessita de especificar a função de risco de base, fazendo com que a sua aplicação permita determinar as variáveis mais importantes no risco de avaria.

$$h(t; Z) = h_0(t).e^{(Z\beta)} \quad (2.8)$$

Em que  $h_0(t)$  é a função de risco arbitrária, não especificada,  $Z$  é o vetor linha das  $K$  covariáveis utilizadas e medidas, e  $\beta$  é o vetor coluna dos  $K$  parâmetros de regressão e  $t$  é o tempo desde a última avaria verificada no sistema.

O modelo de Crow-AMSAA (*Army Material Systems Analysis Activity*) pode ser aplicado quando estamos a estudar a fiabilidade de sistemas reparáveis, em Processos de Poisson não Homogéneos. Neste caso, com o  $SR$  apresenta tendência, trata-se de uma modelação não paramétrica, como já referido. A taxa de ocorrência de avarias aumenta com  $t$  quando  $\beta > 1$  e diminui quando  $\beta < 1$ , assim o modelo pode descrever a variação da taxa de avarias em função do tempo de vida do sistema. Este modelo faz-se representar por:

$$\rho(t) = \lambda\beta t^{\beta-1} \text{ em que } t, \lambda, \beta > 0 \quad (2.9)$$

$\beta$  é o coeficiente de forma,  $\lambda$  é o de escala e  $t$  é o funcionamento do sistema nas unidades respetivas. Este modelo, não paramétrico, também é vulgarmente conhecido pelo modelo de Crow (Pereira & Sena, 2012)

Outra das ferramentas, que podem ser utilizadas para uma análise qualitativa de fiabilidade é o *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)*, que é uma técnica para análise de um sistema em termos dos seus subsistemas e componentes de forma a determinar as causas da avaria e o que pode ser feito para suprir essa avaria. A *Failure Modes and Effects and Criticality Analysis (FMECA)* é o *FMEA* mas com a criticidade de cada uma das avarias. Ou seja o *FMECA* relaciona os eventos de avaria com as suas causas primárias e grau criticidade (Vachtsevanos *et al*, 2006).

Em 2010, Pereira & Canuto referem que o nível de fiabilidade e risco de danos num equipamento depende das necessidades operacionais e de manutenção. Na presente dissertação, ao contrário, são as necessidades operacionais e de manutenção que definem a fiabilidade dum equipamento.

Sobral & Ferreira (2007) referem a importância da aplicação de modelos de fiabilidade na manutenção de equipamentos de proteção contra incêndio na gestão do risco industrial, e apresentam as formas de melhorar essa fiabilidade.

A análise de Pareto pode ser uma ferramenta fundamental na fase inicial de aplicação de um sistema de fiabilidade, em que o tipo de avarias pode ser agrupado de forma a determinarmos qual a maior incidência sobre determinados componentes, e a sua causa (O'Connor & Kleyner, 2011).

Na fiabilidade pode ser ainda utilizada uma árvore de avarias que é um diagrama lógico que mostra a relação entre os vários eventos e as possíveis causas (Blischke & Murthy, 2003).

### **Metodologia Rods**

Em Sobral (2010) é referido que o conhecimento detalhado dos equipamentos a controlar num sistema de manutenção é importante para se obterem resultados fidedignos, principalmente, quando temos equipamentos que têm elevados períodos parados e onde os dados disponíveis são escassos.

Neste caso o autor definiu a metodologia *RODS* de forma a obter resultados dos equipamentos com uma fiabilidade elevada. No caso dos navios existem equipamentos onde os períodos de imobilização podem ser elevados. Neste contexto, de fato, nos períodos de imobilização dos navios, esta metodologia poderia vir a ser aplicada a alguns sistemas.

Tal como já foi referido na fase de desenvolvimento dum equipamento dever-se-á caracterizar os seus parâmetros de funcionamento também, no desenho de fiabilidade de um produto, sistema ou máquina deve ser tido em consideração uma determinada taxa de avarias característica,  $\lambda$ , sob determinadas condições ambientais ou de instalação (Bentley, 1993).

Para monitorização *offline* Alzghoul & Lofstrand (2011) sugerem a utilização de uma metodologia que permite o tratamento dos dados históricos. Propõem um algoritmo que altera o seu estudo de acordo com a sequência mais recente dos dados de tempo, em que este utiliza vários métodos para detetar avarias em equipamentos. Estes métodos referem-se ao *Scaled-up MEWMA (Multivariate Exponentially Weighted Moving Average)*, ao método de ajustamento regressivo (*regression adjustment method*) e ao método de componentes principais (*principal component method*).

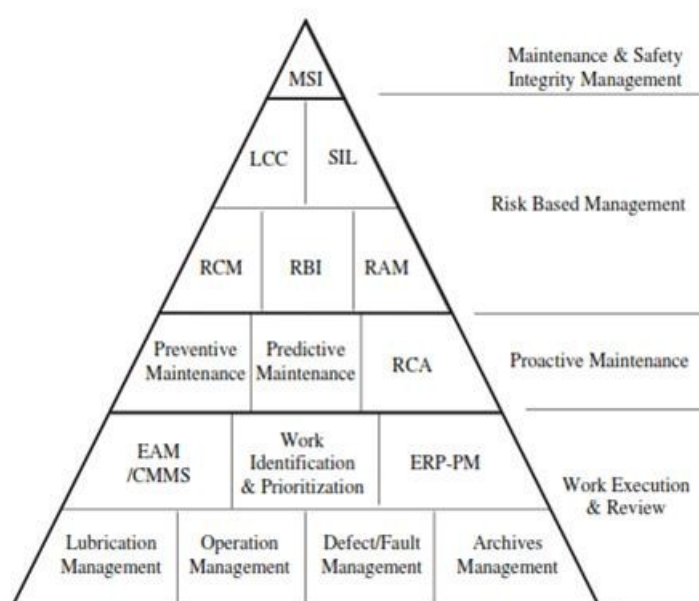


Figura 2.8 Pirâmide Estrutural (Fonte de: Qingfeng *et al*, 2011)

Qingfeng *et al* (2011) apresentam das mais recentes formas de abordagem da manutenção em equipamentos, que é a *MSI (Maintenance & Safety Integrity Management)*. A Figura 2.8 representa a pirâmide estrutural da gestão da integridade de equipamentos em processos industriais considerada por Qingfeng *et al* (2011). Segundo os autores esta metodologia pode ser dividida em quatro etapas: A execução de controlo do trabalho (*Work Execution & Review*), a manutenção proactiva (*Proactive Maintenance*), a manutenção baseada no risco (*Risk Based Maintenance*) e finalmente a *MSI*. Cada um destes aspetos podem utilizar varias técnicas, como o *RBI (Risk Based Inspection)* e o *RCM*.

Esta forma estruturada e integrada de abordar a manutenção permite a tomada de ações preventivas e corretivas eficientes, com risco mínimo de erro e consumos de recursos, também, eles mínimos.

Os métodos *biplot* podem ser utilizados na análise e tratamento dos dados e permitem a representação conjunta de indivíduos e de variáveis de uma matriz multivariável X permitindo, através de representação gráfica, captar correlações entre as variáveis e saber o seu estado relativamente a determinada situação (Villardón, 2011). Estes métodos podem ser aplicados no estudo da performance de equipamentos.

Santos (2011) apresenta uma análise de fiabilidade não *online*, mas *offline* em que divide um plano com 3 fases. Uma fase para tratamento dos dados e identificação dos componentes com anomalias (a primeira), uma segunda fase em que se efetua a caracterização dos componentes com anomalia e uma terceira em que são identificados os modos de avaria. A presente dissertação trata de uma “quarta fase” que é a monitorização *online*, em que as primeiras três fases foram fundamentais para permitir a atual forma estrutural da metodologia.

É ainda importante referir que alguns métodos de classificação de avarias podem ser: *Fuzzy Clustering*, redes neuronais artificiais, e métodos de distância e probabilística geométrica. Não serão, no entanto utilizadas nesta investigação.

Parreira (2009) utilizou a transformada de *VMV* (Vetor de Monitorização de Vibrações) e demonstrou que é uma ferramenta viável para caracterizar o estado de condição de máquinas correlacionando as medições de vibrações em diversos pontos, através da utilização da representação gráfica plana *MDS* (*Multidimensional Scaling*), em que cada estado é um ponto.

Vairinhos (2003) mostrou que os métodos *biplot* são uma boa ferramenta para extração e tratamento de dados, obtendo-se análises de dados fidedignas através de uma análise gráfica em que o ângulo vetorial define a correlação entre os resultados.

### 2.3 Manutenção Baseada no Estado de Condição - Online

Vanneste & Wassenhove (1995), referiam que rápidos desenvolvimentos tecnológicos estavam a suceder na área da tecnologia de informação e que o interface entre o utilizador e os sistemas permitia elevadas possibilidades de processar e tratar os dados. Estas tecnologias poderiam ser utilizadas no acompanhamento de condição dos equipamentos e iriam ser importantes ferramentas de apoio à tomada de decisão.

A manutenção preventiva baseada na fiabilidade dos sistemas na sua génese recorre à utilização de dados históricos de tempos de avaria quer dos equipamentos, quer dos seus respetivos componentes de forma a prever, com base em modelos estatísticos de previsão (Dias *et al*, 2007), o período ótimo de substituição preventiva desses componentes. O que se pretende nesta dissertação não é basear a manutenção em dados históricos ou *offline*, mas sim dados atuais/*online*.

Alzghoul & Lofstrand (2011) referem ainda que se for detetado um sinal característico de anomalia, pode ser utilizado um método de agrupamento (*clustering*) de forma a enquadrar a deteção num sub-cluster e definir padrões de funcionamento. É referido que outros investigadores utilizaram esta técnica aplicada a dados multivariados, como é o caso de Youree *et al* (2008). Numa primeira fase destes testes são utilizados métodos de similaridade e na segunda a determinação de tendência. Segundo os autores estes testes referem-se ao Kolmogorov–Smirnov (*KS*), que neste caso é utilizado para dados univariados, e o teste de Hotelling’s  $T^2$  para dados multivariados.

Alguns autores referem ainda utilização de métodos de monitorização da condição de sistemas (turbinas eólicas), como é o caso do *Condition Monitoring System* (*CMS*) em que existe uma congregação de *hardware* e *software* que vai permitir a recolha e tratamento dos dados e um controlo das atividades relacionadas com a manutenção, minimizando os tempos de paragem e aumentando a disponibilidade dos equipamentos (Hameed, 2009).

Em manutenção em aeronaves, o acompanhamento da condição *online*, é orientada para o processo, em que somente é utilizada uma parte dos dados. Neste tipo de *Condition Monitoring*, são aplicadas técnicas de observação e tratamento de dados que preveem e previnem avarias (Justino, 2009).

Para definir um tipo de manutenção *online* podemos seguir de forma genérica uma integração aproximada do projeto *CBM/PHM* de Vachtsevanos *et Al* (2006), Figura 2.9 em que, de fato definimos os pontos em que devemos efetuar as medidas, efetuamos a aquisição de dados, analisamos os dados, desenvolvemos um método de controlo dos dados e, após isso, validamos a sua implementação.

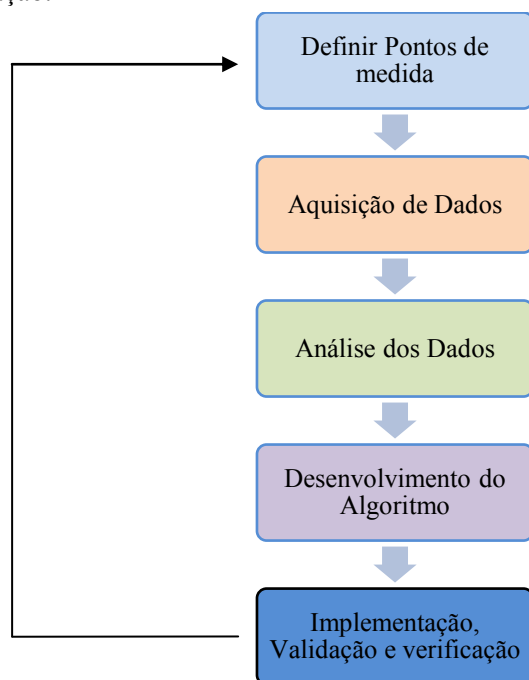


Figura 2.9 Estrutura de monitorização (Adaptado de: Vachtsevanos *et Al*, 2006)

O estudo de condição de um equipamento deve ser contínuo, e no caso de um componente específico, a partir do momento da sua avaria e substituição, o estudo teria que se reiniciar para o novo componente. Pelo que a nível económico, e no caso da medição de vibrações e outros parâmetros, justifica a avaliação integral de um equipamento. No entanto, independentemente do estudo total de um equipamento deve-se considerar as avarias dos componentes, pois poder-se-ão detetar avarias de conceção, ou outras.

Pretende-se com a aplicação das metodologias e técnicas que vão ser desenvolvidas, ter um sistema de recolha e tratamento de dados que sirva de apoio à decisão sobre os trabalhos de manutenção a executar. Mas tendo em consideração que, apesar de estar a ser criada uma ferramenta útil na manutenção, esta não é 100% fiável, e deve ser considerado o historial dos equipamentos e a própria a experiência dos técnicos.

### 2.3.1 Medição e Análise de Vibrações

No início do século passado, as vibrações e a manutenção ainda não se abordavam no seu sentido lato, mas os utilizadores das “*machinas*” já referiam que estas estão sujeitas a forças perturbadoras (Marinha-EN, 1904).

A vibração define-se como uma oscilação em que é medida uma determinada quantidade de movimento dum sistema mecânico (Harris & Piersol, 2002).

A decisão desta investigação incide essencialmente sobre a medição e análise de vibrações e é justificada pela relação existente entre as vibrações das máquinas rotativas e as suas avarias. Sabe-se que uma máquina rotativa tem uma frequência característica de funcionamento, quando essa frequência é alterada devido ao comportamento progressivo de uma anomalia, a frequência e amplitude de vibração tem alterações. Para cada tipo de anomalia existem características típicas (Randall, 2011).

A aplicação da medição e análise de vibrações às máquinas permite intervenções preventivas, à semelhança do que ocorre a um ser humano quando se aplicam técnicas de deteção e diagnóstico do estado da sua saúde. As vantagens destas técnicas são (Sampaio, 1999):

- Deteção da maioria das avarias;
- Deteção das avarias na sua fase inicial, e por isso dá para aplicar o método de análise de tendência;
- Deteção das avarias sem ser necessário parar os sistemas;
- Permitem diagnosticar a causa da avaria.

Para efetuar um estudo com medição e análise de vibrações de uma determinada estrutura ou equipamento são aplicados métodos de elementos finitos suportados por computadores e *software* desenvolvidos para o efeito (Meirovitch, 1975). Nesta investigação não serão aprofundados estes métodos, a análise vibração será efetuada com base na análise do resultado global da vibração e da representação do seu espetro.

De referir ainda que, quando se efetua a recolha de dados se deve ter em conta a armazenagem dos dados. E aqui podemos falar de *data mining*, para a organização dos dados, em que o que importa não é só a quantidade de dados, mas a qualidade desses mesmos dados (Berthold, 2012).

Quando se efetua um planeamento de recolha de vibrações algumas inquirições devem ser tomadas como por exemplo: qual o equipamento que se seleciona para efetuar as medidas, quais os pontos em que se devem recolher dados, qual a periodicidade e quantidade da recolha de dados (VDI, 1982), quem vai recolher os dados, como tratar os dados. Neste âmbito, e no caso de navios, na escolha da periodicidade de recolha de dados deve ser tomado em conta o ciclo do navio e os períodos de navegação.

Os objetivos atingidos com a recolha dos dados são a caracterização da assinatura vibratória dos equipamentos em que, qualquer alteração de sinal poderá significar uma eventual anomalia. Cada equipamento ficará com uma ficha individual do seu desempenho de funcionamento e, desta forma, é possível identificar se existe diferença entre os mesmos parâmetros recolhidos de máquinas iguais, do mesmo ou de diferentes meios navais. Devemos ter em atenção que diferentes pessoas a coletar os dados podem significar valores diferentes na recolha dos mesmos. A existência de um sistema fixo e automático de recolha de dados e análise de resultados poderia representar uma situação mais fidedigna.

### 2.3.1.1 Medição de Vibrações

Na presente investigação escolheu-se, primordialmente, a análise de vibrações para efetuar o acompanhamento de condição de um equipamento porque, permite caracterizar o funcionamento de uma máquina. Conhecendo a sua vibração padrão podemos, a partir desses valores, detetar e diagnosticar anomalias e a sua gravidade, de forma a atuar proactivamente e em tempo útil da forma mais adequada possível. Ciente que cada equipamento pode ter necessidades de monitorização diferentes, e que a própria técnica medida de vibração depende das suas características (MIL, 2005).

Com a aplicação desta técnica será possível concretizar a redução dos custos e da operacionalidade dos sistemas (Institute, 2005).

Quando queremos iniciar um processo de medição de vibrações devemos ter em consideração que todos os sistemas têm uma vibração natural que representa os modos possíveis de vibrar. Essas frequências de vibração dependem da natureza desses sistemas, dos materiais utilizados, da distribuição das massas, da montagem a que foi sujeito e do tipo de componentes que tem na sua constituição (Filho, 2005).

Quando se decide medir o nível de vibrações podemos utilizar vários métodos: apalpação, estetoscópio, um equipamento portátil com *software* de medição e tratamento de dados, ou através de sistemas fixos com o mesmo tipo de tecnologia que os portáteis.

Para medir vibrações podemos ter, tipicamente, 3 tipos de transdutores: transdutores de deslocamento, de velocidade e de aceleração. Cada um tem um tipo de aplicação específico.

Os transdutores de deslocamento, se estiverem a medir por exemplo vibrações numa chumaceira de uma turbina são instalados no seu interior e por isso são fixos, eles medem o movimento relativo entre o veio e a extremidade do sensor (Institute, 2005). As vantagens deste transdutor são a resposta a baixas frequências (até 0 Hz ou DC) e a sua fiabilidade na medição do deslocamento relativo do veio em relação à chumaceira. As suas desvantagens são a dificuldade de instalação e o seu preço, a calibração que, depende do material do veio a medir, o desgaste no veio e eventuais avarias que podem produzir erros nos sinais. Geralmente não podem ser utilizados para medições de alta frequência. As vibrações em deslocamento são medidas em mm pico-a-pico (ou mils pico-a-pico) ou m pico-a-pico (ou microns pico-a-pico). São geralmente aplicados em máquinas de baixa velocidade 600 RPM (10Hz).

Os valores de vibração são frequentemente trabalhados em unidades de velocidade mas, normalmente, não se utilizam transdutores de velocidade nas medições. As vantagens da sua utilização são as seguintes: não necessitam de alimentação externa (pois gera eletricidade), o sinal de saída é elevado, pode operar com temperaturas elevadas e é fácil de utilizar. A nível de desvantagens: tem grandes dimensões, é sensível a alterações de temperatura, inclui componentes móveis por isso está sujeito a desgaste, não deve ser utilizado para medições de baixas e altas frequências e é pouco preciso (tem baixa razão sinal/ruído).

Os transdutores de aceleração, chamados de acelerómetros, são os mais comumente utilizados para medir a vibração em equipamentos mecânicos. Estes geralmente são piezoelétricos e são montados externamente nos equipamentos a serem monitorizados a nível das vibrações. A nível das suas vantagens, podem ser aplicados em ambientes com elevada temperatura, possuem uma elevada sensibilidade.

Em termos de unidades de vibração a velocidade é considerada uma medição para medir a severidade da vibração, enquanto a aceleração está ligada às forças existentes na máquina.

Tabela 2.5 Limites do estudo das vibrações (Fonte de: Institute,2005)

Unidade	Limites Utilização
Deslocamento	Velocidade inferior a 600 rpm e equipamento com chumaceiras de atrito
Velocidade	Velocidade entre 1000 a 10000 rpm
Aceleração	Com velocidade superior a 10000 rpm

O estudo das vibrações deverá ser realizado em função da velocidade de rotação de um equipamento (Institute, 2005), Tabela 2.5.

### **Posicionamento de Sensores**

Como não será viável tecnicamente nem economicamente a montagem de sensores em todos os componentes e em diversos locais de um equipamento podem ser utilizados sensores triaxiais. Para se obterem bons resultados a instalação de um sensor deve ser a correta (Mota, 2009). Os sensores podem ainda ser permanentes ou temporários se forem montados num equipamento só por rotina. Os permanentes são geralmente montados em equipamentos mais críticos e de acordo com as especificações do utilizador. A montagem dos sensores quer permanentes quer temporários deve levar em conta a segurança do material e pessoal.

Na presente dissertação, em que num dos casos se estudou uma eletrobomba, o acelerómetro do equipamento portátil utilizado apenas mede vibrações numa direção, para o caso das turbinas a gás que vão ser estudadas os sensores são fixos e, também, só medem numa direção. No caso das turbinas, existe um equipamento que pode ser ligado ao sistema de comando e controlo e efetuar um diagnóstico complementar. No entanto, este equipamento não existe na organização, recorrendo-se a *outsourcing*.

Consoante o eixo de montagem dos sensores devem ter-se em conta determinados tipos de avaria, como é o caso do desequilíbrio e do desalinhamento que são melhor diagnosticados com recurso a dados nos três eixos.

A superfície a ser medida deve estar limpa, sem rugosidades e sem estar pintada, para que a medição seja o mais fidedigna possível não possibilitando a ocorrência e alterações da frequência. As ponteiros dos sensores podem tomar diversas formas e podem ser constituídas por diversos materiais sendo que nos de contacto superficial os magnéticos são geralmente mais aconselháveis, mas os mais fidedignos são os roscados (Mota, 2009). Consoante o tipo de ponteira é introduzida uma frequência de ressonância. Que aumenta com o grau de fixação do sensor. Na Figura 2.10 (Institute, 2005) podemos observar vários tipos de ponteiros.

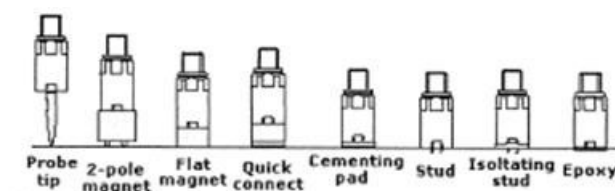


Figura 2.10 Ponteiros de sensores de vibração (Fonte de: Institute, 2005)

### **Frequências Características**

As formas de onda e os espetros obedecem a um padrão que se baseia nos componentes rotativos de um equipamento. Ou seja, se tivermos um veio a rodar, este vai gerar uma frequência à velocidade de rotação. Assim, se o veio rodar a 1000 rpm, será expectável aparecer um pico de vibração no espetro a 1000 rpm (Institute, 2005).

De forma a simplificar a análise de vibrações e o respetivo diagnóstico de anomalias foi convencionado a descrição das frequências no espetro por ordens. Na prática estes são múltiplos da velocidade de rotação. Para o caso do veio referenciado no parágrafo anterior, lê-se a velocidade de referência, ou 1X (Institute, 2005).

Se para um determinado motor tivermos uma turbina de arrefecimento de 8 pás é provável que surja um novo pico a 8X a velocidade do veio (Institute, 2005).

### **Medições de Níveis Globais**

Para muitos autores a medição do nível global de vibração *Root Mean Square (RMS)* é essencial, pois normalmente representa estado geral da máquina e, numa situação posterior, pode-se efetuar a análise por frequência para efetivamente diagnosticar a anomalia (Alves *et al*, 2011).

Os valores da *Root Mean Square (RMS)* permitem a deteção de vibração anómala na maioria dos casos, esta vibração pode ser dada por:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} x_i^2} \quad (2.10)$$

De referir que na medição e análise de vibrações “A repetibilidade é essencial.” (Institute, 2005) Porque a repetibilidade é a capacidade de um determinado equipamento de medição, sob as mesmas condições disponibilizar valores de uma característica semelhantes, de forma a se obter um resultado fidedigno que possa servir de base de deteção e diagnóstico na monitorização condicionada *online*.

#### **2.3.1.2 Análise de Vibrações**

Quando se decide efetuar o acompanhamento de condição de um equipamento com medição de vibrações deve ter-se a certeza que este é o método correto para o efeito e que é capaz de detetar anomalias em tempo útil. A esta fase chama-se deteção (Institute, 2005). Assim que for efetuada uma deteção deve ser determinada a gravidade do valor obtido e se possível quais os componentes afetados. São então detetados padrões e efetuadas comparações com leituras anteriores da mesma máquina e de outras semelhantes. A esta fase chama-se análise (Institute, 2005).

Na análise de vibrações se medirmos os valores globais de vibração podemos efetuar uma análise de tendência dos valores (ex: medição em *RMS*, medições alta frequência e/ou outros dados de processo) considerando eventualmente a utilização do *software* que acompanha o equipamento ou aplicando técnicas estatísticas de acordo com os valores medidos. Em qualquer uma das situações devem ser definidos limites para o controlo. Ainda, nesta análise, devem ser consideradas as ações a executar assim que seja detetada uma tendência e quando devem ser tomadas para que se determine o tempo disponível para o funcionamento do equipamento.

### **Análise Espetral**

Quando iniciamos o diagnóstico da anomalia propriamente dito, devemos ter a certeza da qualidade dos dados recolhidos e da sua estabilidade. Depois devem analisar-se os espectros de frequência de forma a verificar padrões como: harmónicas, montes, bandas laterais, etc (Institute, 2005). De acordo com a observação efetuada podemos especificar as avarias (ex: desalinhamento, rolamentos danificados, etc). Os espectros devem também ser validados, pelo que devem ser recolhidas várias amostras de forma a eliminar alguma dúvida no diagnóstico.

De forma a se efetuar a análise espectral, deve ser conhecida a velocidade de rotação dos equipamentos sob estudo, uma vez que no diagnóstico se procuram, principalmente, picos que são múltiplos das razões de velocidade de rotação de diferentes veios. No entanto outros picos que não sejam múltiplos das razões de velocidades podem surgir (Institute, 2005). Portanto a primeira ação a tomar no acompanhamento de condição por medição e análise vibrações é determinar o pico à velocidade de rotação quando o equipamento está operacional. Se o pico não for 1X, se se detetar por exemplo um pico a 4X, dividimos a frequência nesse ponto por 4, para ver se corresponde à frequência natural de vibração do equipamento.

Um pico síncrono pode revelar diagnósticos de desalinhamento, desequilíbrio, folgas, desgaste das pás, engrenamento (Institute, 2005). Podem surgir picos sub-síncronos, mas este tipo de avarias não serão aqui desenvolvidas. Para outros desenvolvimentos deste tipo de picos nas frequências pode ser consultado Institute (2005) e Eshleman (1999).

Ao analisar um espectro tem que se ter linha de conta que os sinais, por vezes, se misturam e podem não ter a ver com os que vão ser expostos nesta investigação, mas sim uma relação entre dois ou mais causadores dessa frequência. Os principais tipos de avarias são o desequilíbrio, desalinhamento, folgas, avarias em rolamentos e pode ainda surgir o fenómeno de ressonância.

### 2.3.1.2.1 Desequilíbrio

“O Desequilíbrio é definido como uma condição em que as “linhas de eixo geométricas do veio e as linhas geométricas da massa não coincidem”, ou seja a massa no veio não está distribuída uniformemente” (Mota, 2009).

O desequilíbrio usualmente é um problema primário, pelo que é um tipo de avaria detetado por vibrações que deve ser eliminado o quanto antes, de forma a não causar outro tipo de avarias, que são secundárias.

A velocidade de um veio de uma máquina influencia o nível de vibração de um equipamento ou sistema. As forças geradas pelo desequilíbrio são proporcionais ao quadrado da velocidade, com rotor abaixo da primeira frequência crítica (Institute, 2005). Considerando-se o nível de vibração a 1X aceitável, sabendo que depende da dimensão e da velocidade do equipamento (Mota, 2009).

Tabela 2.6 Nível de vibração de máquinas com rotação entre 1500-3000rpm (Adaptado de: Institute, 2005)

1X Nível de Vibração	Diagnóstico	Prioridade de Reparação
mm/s RMS		
<2,5	Desequilíbrio ligeiro	Sem Recomendação
2,5-5,0	Desequilíbrio moderado	Desejado
5-15.8	Desequilíbrio Severo	Importante
>15.8	Desequilíbrio Extremo	Obrigatório

Podem ser caracterizados quatro tipos de desequilíbrio (Roque, 2002): desequilíbrio estático, desequilíbrio de momento, desequilíbrio quasi-estático e o desequilíbrio dinâmico. De seguida representa-se um exemplo de um desequilíbrio estático em que, sem outro tipo de perturbação em

simultâneo produz um espectro de vibrações 1X elevado, em que a amplitude é proporcional à severidade do desequilíbrio e ao quadrado da rpm. Os níveis de vibração a 1X registados nos rolamentos dependem da localização do peso no veio (Mota, 2009). A Figura 2.11 representa um desequilíbrio estático.

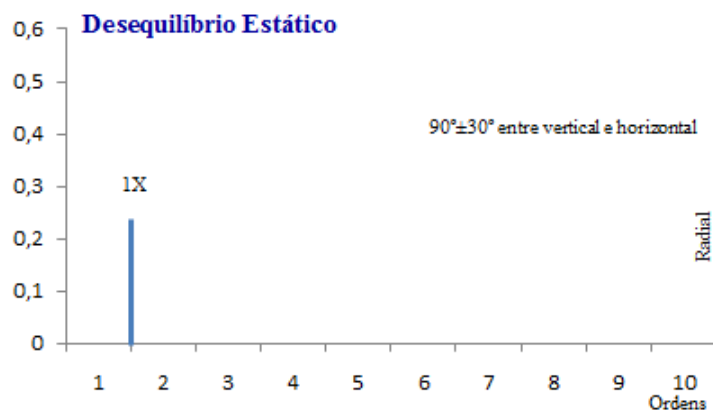


Figura 2.11 Desequilíbrio estático (Adaptado de: Institute, 2005)

Para mais desenvolvimentos sobre os outros tipos de desequilíbrio deve ser consultado (Eshleman, 1999).

### **Causas do Desequilíbrio**

Uma máquina em desequilíbrio pode causar danos nos rolamentos e nos empanques de eletrobombas e motobombas.

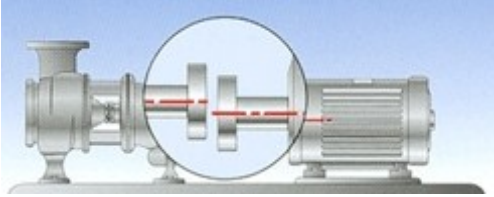
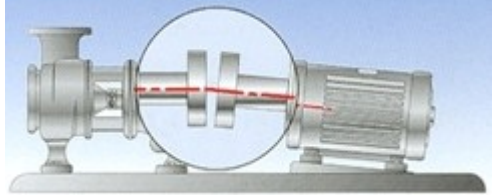

As causas de desequilíbrio podem ser (Eshleman, 1999):

- Sujidade acumulada de forma desigual em rotores de ventiladores;
- Falta de homogeneidade nos materiais nas peças constituintes de um equipamento rotativo;
- Dimensões diferentes das peças de união;
- Componentes excêntricos, partidos e empenados;
- Rotores fissurados;
- Erros de fabricação;
- Massas de equilibragem perdidas;
- Desgaste e corrosão irregular ou erosão dos rotores;
- Outros.

#### **2.3.1.2.2 Desalinhamento**

Quando estamos a analisar um desalinhamento verifica-se que as linhas dos veios acoplados não coincidem (Mota, 2009).

Tabela 2.7 Tipos e características de desalinhamento (Adaptado de: Institute, 2005)

Desalinhamento Paralelo	<p>Quando as linhas dos eixos são paralelas mas não coincidem.</p> <p>Elevados níveis de vibração a 2X (este geralmente mais elevado) e a 1X nas direções radiais (V (Vertical) e H (Horizontal)) nos rolamentos do lado do acoplamento.</p> <p>Se for um desalinhamento paralelo puro, os níveis axiais a 1X e a 2X serão baixos.</p>	 <p>(Fonte de: Preditech, 2012)</p>
Desalinhamento Angular	<p>Sempre que o desalinhamento se encontrar num ponto e não for paralelo.</p> <p>Vibração radial elevada (vertical e horizontal) de nível 1X a 2X, no entanto os componentes estão em fase.</p>	 <p>(Fonte de: Preditech, 2012)</p>
Desalinhamento Comum	<p>Provoca um momento fletor em cada veio e é uma combinação do desalinhamento paralelo e angular. É 2X a razão de rotação (1X) nas direções A (Axial) e H ou V.</p>	 <p>(Fonte de: Soler &amp; Palau, 2012)</p>

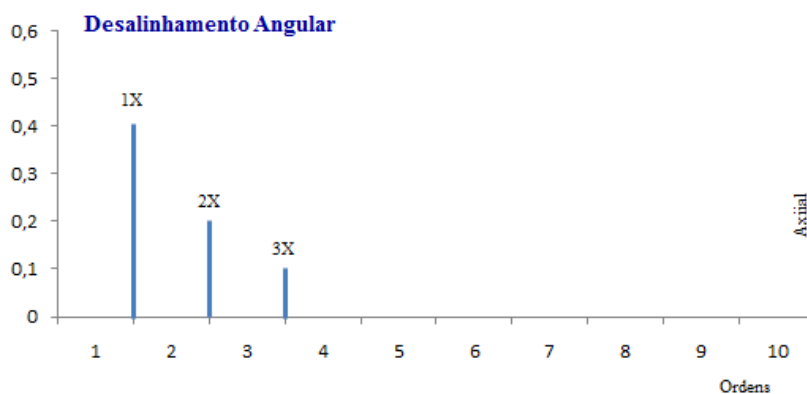


Figura 2.12 Causas do desalinhamento (Adaptado de: Institute, 2005)

O desalinhamento angular produz momentos fletores em cada veio, causando uma vibração elevada a 1X, e outra a 2X que se obtém na direção axial em dois rolamentos. A Figura 2.12 representa o espectro de um desalinhamento angular (Institute, 2005).

Em acoplamentos flexíveis podem detetar-se harmónicas 1X e 2X. Por vezes a leitura de um pico a 3X elevado pode ser associado a um desalinhamento (Mota, 2009).

Se quisermos distinguir o desalinhamento do desequilíbrio deve-se aumentar a velocidade de rotação do equipamento caso seja possível, o que não é o caso da eletrobomba protótipo da presente investigação. Pois, neste caso, a vibração por desalinhamento não aumenta mas, a por

desequilíbrio, caso exista, aumenta com o quadrado da velocidade de rotação. Um desacoplamento também será uma solução se quisermos efetuar o diagnóstico de um equipamento.

Ao efetuar a medição vibrações de um equipamento para eventual despistagem de anomalia deve ser esperado a estabilização do equipamento para que os materiais estejam estáveis relativamente a contrações e expansão térmicas que influenciem as medições.

### **Causas do Desalinhamento**

O desalinhamento pode ser originado devido a (Eshleman, 1999):

- Montagens inadequadas;
- Alinhamentos imprecisos;
- Desgaste de apoios e rolamentos;
- Expansão térmica ignorada;
- Apoios com altura desadequada.

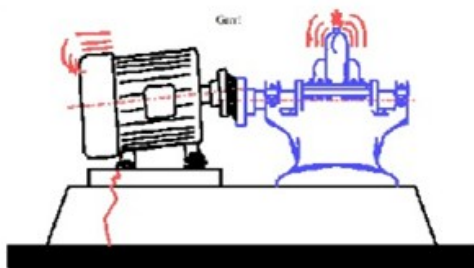


Figura 2.13 Equipamentos a vibrar por desalinhamento (Fonte de: Ebah, 2013)

Quando um sistema rotativo, por exemplo uma eletrobomba, é desacoplado, aquando da sua montagem devem sofrer procedimentos de alinhamento. Esta ação eliminará forças nos componentes dos equipamentos agora montados.

Ao eliminar as forças desnecessárias teremos o seguinte:

- Redução do nível de vibração e ruído;
- Minimizar as folgas no acoplamento;
- Eliminar a possibilidade de avaria no veio devido a fadiga.

O alinhamento e equilibragem de máquinas rotativas não será objeto de estudo nesta investigação.

#### **2.3.1.2.3 Veio Empenado**

A condição de veio empenado é por vezes confundida com um desalinhamento ou desequilíbrio. Este tipo de anomalia provoca uma vibração elevada dominante a 1X, esta ocorre a 2X se o empeno se encontrar próximo do meio do veio (Nepomuceno, 1985). A Figura 2.14 representa um espectro de um veio empenado (Institute, 2005).

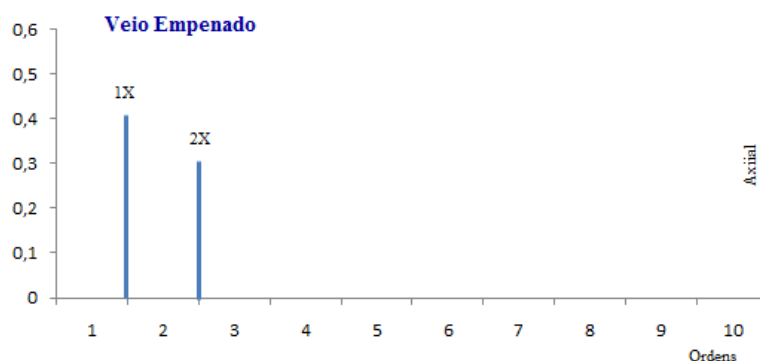


Figura 2.14 Vibrações em veio empenado (Adaptado de: Institute, 2005)

Se efetuarmos uma medição na vertical e outra na horizontal consegue-se detetar as vibrações mas, a medição axial, é que permite um diagnóstico mais objetivo.

#### 2.3.1.2.4 Rolamento Enviesado

É uma forma de desalinhamento num acoplamento coincidente com um desequilíbrio, pode ocorrer por exemplo em eletrobombas ou em eletroventiladores. Se estivermos na presença de picos a 2X e 3X estaremos na presença de um rolamento enviesado em vez de somente desequilíbrio. A Figura 2.15 representa o espectro de um rolamento enviesado (Institute, 2005).

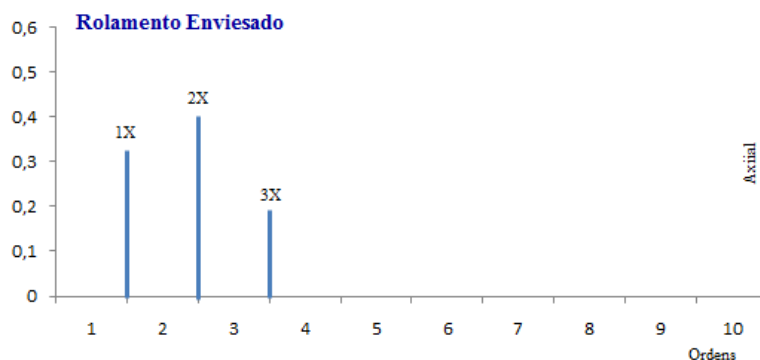


Figura 2.15 Vibrações em rolamento enviesado (Adaptado de: Institute, 2005)

#### 2.3.1.2.5 Ressonâncias

A ressonância ocorre quando uma frequência de excitação estiver próxima de uma dada frequência natural da estrutura da máquina, ou seja é uma reação de uma estrutura a uma determinada frequência (MIL, 2005). Um determinado equipamento pode ter várias frequências naturais. Num espectro a ressonância é identificada como um pico em que a frequência é constante mesmo se a velocidade assumir outros valores. O pico pode ser representado de forma clara ou larga, mas depende da quantidade de amortecimento efetivo que o equipamento possui com essa frequência específica. A Figura 2.16 representa um espectro de uma frequência de ressonância.

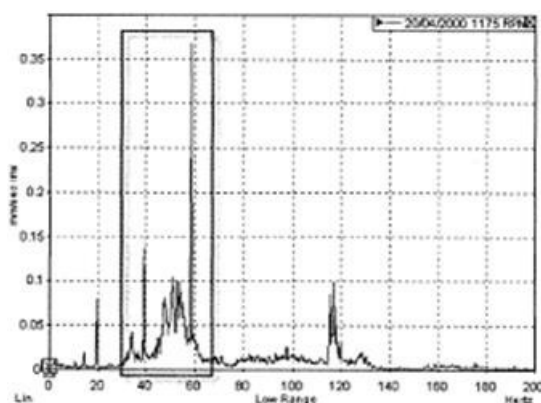


Figura 2.16 Frequência de ressonância (Fonte de: Institute, 2005)

A ressonância só ocorre se houver uma energia que excite a vibração, mas se a frequência de ressonância coincidir com as frequências a 1X, 2X, ou com uma frequência de passagem de pás, os níveis de vibração podem aumentar e poderá surgir um pico bastante elevado acima de vários pequenos picos.

#### 2.3.1.2.6 Avarias em Rolamentos

Se as máquinas rotativas forem montadas de forma adequada e objeto de uma correta manutenção, então o seu alinhamento e equilíbrio deverão estar corretos. Se não funcionarem próximas das frequências de ressonância e tiverem uma lubrificação correta, a sua vida útil é prolongada.

#### Deteção de Frequências em Rolamentos

Se se possuir uma anomalia num rolamento, os componentes de vibração não são exatamente múltiplos de 1X, ou seja são componentes não síncronos.

Por essa razão são definidas quatro frequências características do rolamento:

- Frequência da gaiola (FT - *Fundamental Train*);
- Frequência da pista interna (BPI – *Ball Pass Inner Race*);
- Frequência da pista externa (BPO – *Ball Pass Inner Race*);
- Frequência dos elementos rolantes (BS - *Ball Spin*).

Se tivermos as frequências características em ordens (FT=0,4X), para calcular a frequência final temos que multiplicar a ordem pela velocidade do veio onde se encontra o rolamento, se o gráfico estiver caracterizado por ordens, a ordem 0,4 verifica-se no eixo dos x (Pereira, 2011) (Institute, 2005). A Figura 2.17 representa um espectro com bandas laterais aos picos correspondentes a avarias em rolamentos (Institute, 2005).

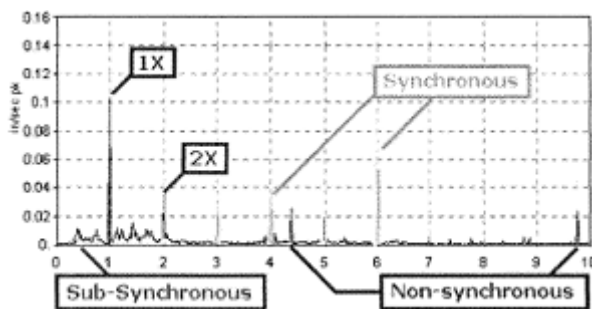


Figura 2.17 Avarias em rolamentos – espectro com bandas laterais (Fonte de: Institute, 2005)

Para efetuar o cálculo das frequências características para cada componente deve ser utilizado um formulário apropriado que pode ser consultado em Mota (2009).

As causas da deterioração nos rolamentos podem ser: desequilíbrio, erro de projeto ou reparação utilizando um rolamento inapropriado, desgaste pela utilização, variações bruscas de temperatura, lubrificação inadequada, sobrecarga e partículas abrasivas ou corrosivas nos lubrificantes (Nepomuceno, 1985).

**2.3.1.2.7 Forças Hidráulicas e Aerodinâmicas**

**Avarias em pás**

Normalmente todas as bombas, ventiladores e compressores têm um espectro com um pico à frequência de passagem das pás. A frequência final é:

$$\text{Passagem das pás} = \text{Número de pás} \times \text{RPM}$$

A amplitude do pico aumenta se o espaço entre as pás e o difusor estacionário não for igual, ou se ocorrerem obstruções ou fluxos com curvas abruptas (Eshleman, 1999).

A Figura 2.18 representa um espectro da frequência de passagem de pás (Institute, 2005).

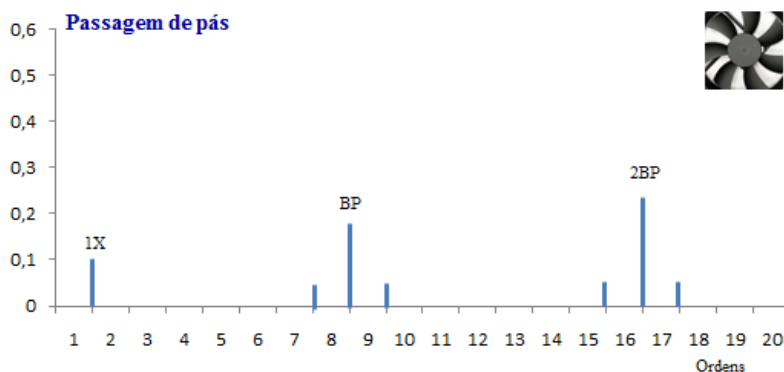


Figura 2.18 Frequência de passagem de pás (Adaptado de: Institute, 2005)

### Turbulência do fluxo

A turbulência do fluxo deve-se a variações de pressão ou de velocidade do ar quando passa por um ventilador, esta situação origina vibrações de baixa frequência aleatórias que ocorrem entre os 50 a 2000 rpm. A Figura 2.19 representa um espectro de turbulência num fluxo (Institute, 2005).

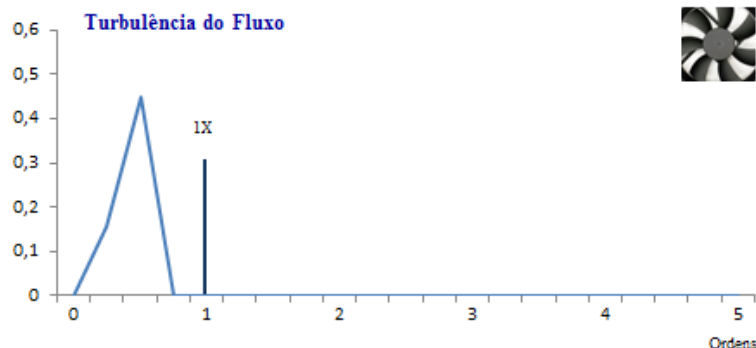


Figura 2.19 Turbulência do fluxo (Adaptado de: Institute, 2005)

### Cavitação

A cavitação gera vibrações de alta frequência aleatórias ou o chamado ruído, em que no espectro aparece sob a forma de um monte. Pode indicar a presença de bolhas de ar, temperatura alta, e pode produzir um som como se houvesse gravilha dentro da bomba. Por vezes a sua deteção é efetuada pelo ruído emitido. Como as vibrações de cavitação são geralmente a alta frequência é recomendável que a leitura de vibrações seja em aceleração (Nepomuceno, 1985). A Figura 2.20 representa um espectro típico de cavitação (Institute, 2005).

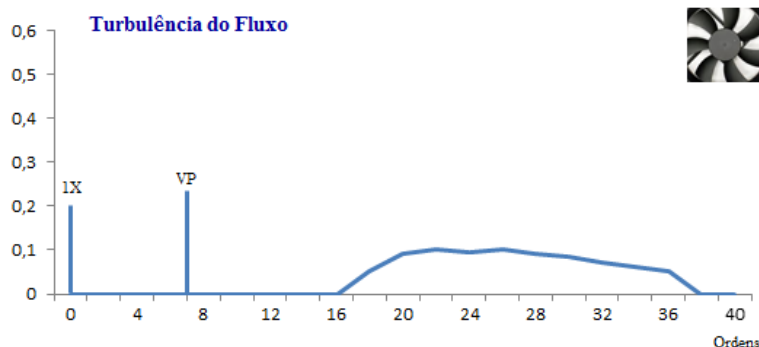


Figura 2.20 Cavitação (Adaptado de: Institute, 2005)

#### 2.3.1.2.8 Avarias Típicas em Equipamentos

##### Avarias em Bombas

Relativamente às bombas centrífugas existe uma frequência associada ao número de pás do rotor e à sua velocidade. Se a amplitude da frequência aumentar significa que pode existir um problema com o impulsor, com o fluxo do fluido ou então um desalinhamento. Podem ainda surgir harmónicas da frequência de passagem de pás do rotor. A Figura 2.21 representa o espectro de passagem de pás dum rotor de uma bomba centrífuga (Institute, 2005).

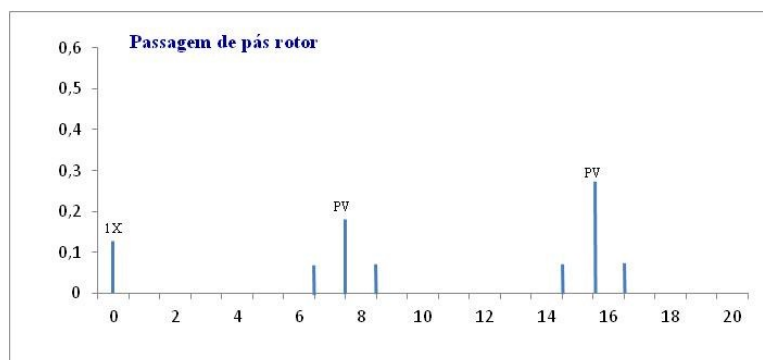


Figura 2.21 Espectro de uma avaria numa bomba (Adaptado de: Institute, 2005)

Nesta investigação somente será referida a avaria em bombas centrífugas, porque é o tipo de bomba que vai ser analisado (Institute, 2005).

### Avarias em Ventiladores

Os ventiladores geralmente ou são do tipo centrífugo ou do tipo de hélice de fluxo axial. Como qualquer outro equipamento ou parte dele, devido às suas características de sucção de ar ou gás, são propícios a acumular resíduos na superfície das suas pás, situação que pode causar desequilíbrio. Se se tratar de um ventilador em consola, a amplitude de vibração 1X será segundo a direção axial. (Mota, 2009) A Figura 2.22 representa o desequilíbrio de pás em ventiladores (Institute, 2005).

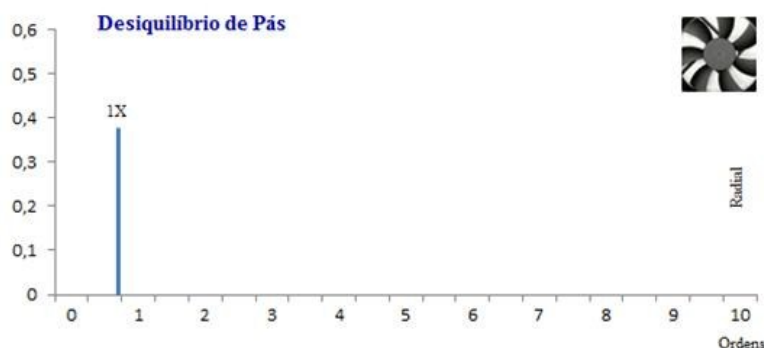


Figura 2.22 Detecção de Avarias em ventiladores de consola (Adaptado de: Institute, 2005)

Se ocorrer a deformação de alguma das pás, a amplitude da frequência de passagem das pás aumenta e se o caso for relativo a várias pás, surgiram bandas laterais a 1X à volta da frequência de passagem das pás. Se houver folgas de tolerância são visualizadas harmónicas da frequência da passagem das pás.

No caso de ventiladores centrífugos a distribuição da velocidade do ar é irregular à entrada, o que provoca o aumento da vibração com a passagem das pás. Se o ventilador estiver em desequilíbrio e se for de consola, o pico da vibração a 1X com amplitude elevada surge na direção axial e nas duas direções radiais. A Figura 2.23 (Institute, 2005) representa o espectro de passagem de pás de ventilador, que aparentemente possui semelhanças com a passagem de pás de rotores de bombas centrífugas.

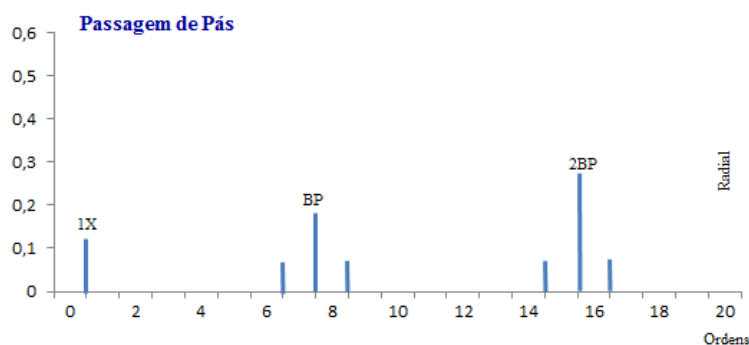


Figura 2.23 Detecção avarias em ventiladores de consola, caso pá danificada (Adaptado de: Institute, 2005)

No caso de as pás serem defeituosas poderão surgir bandas laterais a 1X à volta da frequência de passagem das pás.

De referir que o sistema de refrigeração do motor elétrico do equipamento protótipo que vai estar sob investigação é tipo Fan (com 12 pás).

### Avarias em Motores Elétricos

Usualmente os motores elétricos sofrem problemas de desequilíbrio ou de desalinhamento. A eletrobomba que vai estar sob investigação, utiliza uma frequência de rede elétrica de 50Hz e tem quatro polos (oito enrolamentos) no estator, o campo roda a 1500rpm.

Se existirem problemas no estator são geradas vibrações elevadas na segunda harmónica da frequência da rede elétrica (100 ou 200Hz). Se existir uma excentricidade do estator é produzido um entreferro estacionário desigual entre o rotor e o estator que vai provocar uma vibração direcional. A Figura 2.24 representa uma avaria no estator de um motor elétrico (Institute, 2005).

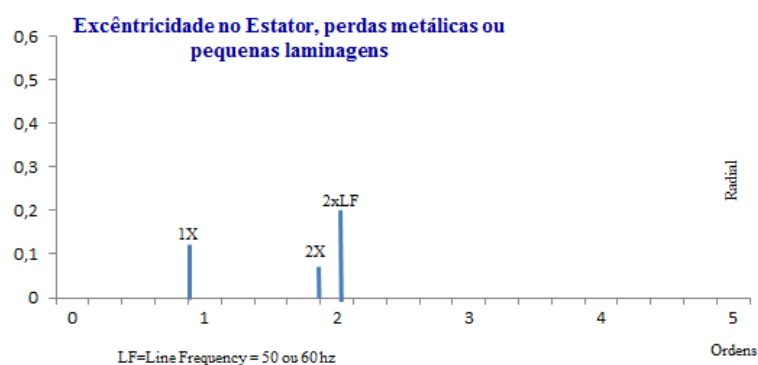


Figura 2.24 Avaria no estator de um motor elétrico (Adaptado de: Institute, 2005)

Os problemas chamados de “pata-coxa” ou bases deformadas podem originar um estator excêntrico, se se alternar a tensão dos pernos de fixação do motor ou se reparar os apoios pode ser resolvida a situação.

No caso de rotores excêntricos produz-se uma variação do entre ferro rotativa entre o rotor e o estator, que vai induzir uma fonte de vibração pulsatória. Também nesta situação se observa a componente a 2X a frequência da rede elétrica, mas existirão bandas laterais à frequência de passagem dos polos à volta desta frequência e também a 1X (Mota, 2009).

A frequência de passagem dos polos é o resultado da frequência de escorregamento vezes o número de polos. E a frequência de escorregamento é igual à diferença entre a velocidade real e a velocidade síncrona. A Figura 2.25 representa o espectro de avarias em rotores excêntricos (Institute, 2005).

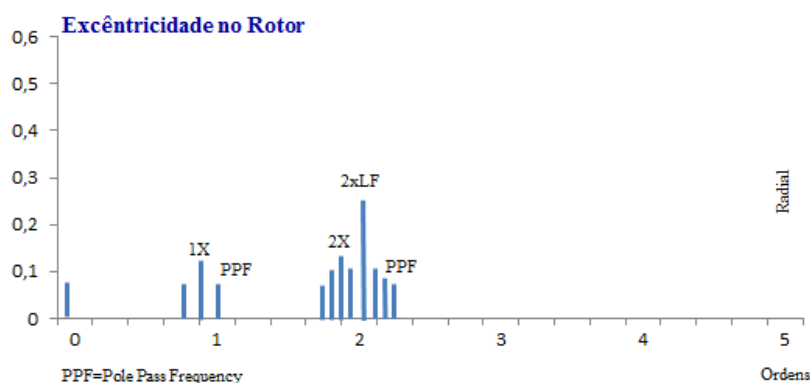


Figura 2.25 Avarias em rotores excêntricos (Adaptado de: Institute, 2005)

Quando a frequência de escorregamento é muito baixa, a frequência de passagem dos polos é também baixa, pelo que se deve utilizar metodologias que permitam uma elevada resolução para determinar as bandas laterais.

Se se tratar de um motor de indução podem por vezes surgir barras partidas, fissuradas ou corroídas, devido às suas paragens e arranques em plena carga, que fazem variar a corrente, e que originam grandes aquecimentos no seu corpo.

### **Avarias em Uniões de Acoplamento**

Os problemas nas uniões de acoplamento possuem sintomas de anomalia similares aos do desalinhamento a 1X, principalmente se as faces dos flanges não forem paralelas (Institute, 2005). O desequilíbrio nos acoplamentos pode ainda produzir amplitudes dos componentes radiais a 1X e 2X.

Para resolução de eventuais estados de condição, pode ser consultado o Tabela IV.2 do anexo 4, de Courrecch & Eshleman (2002) e Eshleman (1999).

Existem mais tipos de anomalias, mas não serão abordados nesta investigação devido às características dos equipamentos que vão estar sob estudo.

A área da medição e análise de vibrações é vasta e existem muitos dados técnicos de investigação sobre avarias em componentes e equipamentos, mas não serão aqui referidos por razões de limites de dimensão e porque a grande maioria não foram aplicados nesta investigação. Para mais desenvolvimentos deve ser consultado Institute (2005).

## **2.4 Considerações**

De referir que existe um vasto número de autores que desenvolveram técnicas e metodologias de acompanhamento de condição de equipamentos e de conceção de produtos. Neste capítulo foi exposta uma pequena amostra destes métodos.

Esta investigação focou-se em técnicas estatísticas capazes de efetuar monitorização de características de funcionamento de equipamentos de forma a ocasionar os processos de manutenção. Vai ser utilizada a representação gráfica na análise da condição, pois facilita a interpretação dos resultados.

Barbosa (2012) utilizou as cartas de controlo para controlo de condição do mesmo protótipo utilizado na presente investigação.

Na presente investigação e em continuidade do desenvolvimento das cartas de controlo para aplicação em acompanhamento de equipamentos mecânicos, serão propostos modelos de cartas de controlo modificadas e outros métodos gráficos para diagnóstico de avarias.

Considera-se que os temas abordados em cima, e aqueles que ainda vão ser desenvolvidos no Capítulo 3 contribuem para um tipo de manutenção *Lean* (Lampreia & Parreira, 2011). Com o objetivo de aproximar de Yile *et al* (2008) espera-se que, com a metodologia desenvolvida, se possa contribuir para um aumento muito significativo da disponibilidade e, simultaneamente, uma diminuição acentuada das despesas atuais de manutenção com o pessoal e material.

Os métodos de controlo de condição definidos, podem ser aliados a um sistema de controlo da condição que obedecem às exigências *Lean* de todos os sistemas tecnológicos atuais. Em que pode contribuir para um melhor desempenho dos meios navais e conseqüentemente da Organização onde a investigação foi realizada.



---

## **CAPÍTULO 3 - MANUTENÇÃO CONDICIONADA COM APLICAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLO MODIFICADAS**

---

*“Machina...uma reunião de corpos resistentes, uns aparentemente fixos, outros móveis, dispostos de modo a obrigar em geral, as forças motrizes naturais a dar origem a movimentos determinados, a despeito das resistências que a estes se oppõem.”  
(Escola Naval, 1904)*



## CAPÍTULO 3

### 3.1 O Controle Estatístico na Manutenção

### 3.2 Monitorização da Condição com Cartas de Controle Modificadas - Fase 1

### 3.3 Auto-correlação dos Dados

### 3.4 Monitorização de Equipamentos – Fase 2

### 3.5 Cartas de Controle Short Run Modificadas

### 3.6 Considerações

### 3.1 O Controle Estatístico na Manutenção

A maioria dos atuais métodos de acompanhamento da condição de equipamentos não é efetuada *online* mas sim, de forma periódica. Estas metodologias, apesar do tratamento posterior dos dados, são mais lentas na detecção de anomalias.

O Controle Estatístico do Processo (*SPC*) tem como principal objetivo estabilizar e aumentar a qualidade de um produto, atuando no controle estatístico das variáveis que melhor caracterizam a qualidade pretendida. Na presente dissertação, assume-se que esse objetivo é atingido monitorizando as variáveis que melhor caracterizam o estado ou condição do funcionamento dos equipamentos. Assim, as tradicionais cartas de controle serão modificadas, de acordo com uma metodologia inovadora que permitirá a sua aplicação à monitorização do funcionamento de equipamentos mecânicos. A não modificação das cartas pode originar sinais de alarme no funcionamento de um equipamento, que na realidade não traduzem uma real necessidade de intervenção de manutenção.

Existem inúmeras publicações na área do controle estatístico de processos em que se utilizam cartas de controle; na área da manutenção, são escassas as referências onde seja, eventualmente, aplicada uma metodologia semelhante.

As referências existentes com a mesma abordagem são, nesta área Dias *et al* (2009) e Barbosa (2012) que utilizam as cartas de controle univariadas e especiais - para monitorização *online* de dados. No desenvolvimento desta metodologia são definidas regras para investigação ou intervenção na anomalia detetada, impedindo eventualmente a ocorrência de avarias catastróficas. Outras referências, mas com outro tipo de abordagem, serão apresentadas mais à frente.

### 3.1.1 Técnicas Estatísticas na Atualidade e a Manutenção

“Quality is the totality of features and characteristics of a product or service that bear on its ability to satisfy stated or implied needs.” (ISO 9001, 2008) Comparando com o que se deseja da performance de um equipamento, verificamos que esta definição de qualidade se aplica, integralmente, à conjugação dos vários parâmetros e características técnicas que permitem obter a disponibilidade para o fim designado.

“Os dois principais objetivos da análise de dados podem ser: explorar os dados para descobrir ou identificar os aspetos ou padrões de maior interesse, representar os dados de maneira a destacar ou chamar a atenção para esses aspetos ou padrões.” (Murteira, 1993). Ao analisarmos os dados de funcionamento de um equipamento vai ser possível obter a caracterização do seu comportamento no tempo.

“Em estatística, “população” designa um conjunto de elementos com alguma característica comum e com potencial interesse para o estudo.” (Murteira, 1993). No caso presente, a população é a totalidade dos valores de uma variável (simples ou multivariada) que caracteriza o funcionamento do conjunto de equipamentos iguais existentes, num certo estado ou condição.

“Quando escolhemos uma determinada amostra para caracterização de uma população, esta tem que ser representativa da população em geral”, ou como vai ser o caso, ser representativa do estado do equipamento. As conclusões obtidas da caracterização da amostra (objeto da Estatística Descritiva) devem ser generalizáveis para a população teórica. Ao processo de generalização das conclusões do estudo das amostras chamamos Inferência Estatística. A Estatística Descritiva caracteriza a amostra, e a Inferência Estatística generaliza para a população teórica.” (Maroco, 2003).

“Realizada uma experiência, compete ao estatístico interpretar os dados obtidos, e através deles, extrair conclusões, válidas estatisticamente, para a população sujeita a investigação.” (Fonseca, 2001) Numa monitorização de equipamento, ao termos concretizado a nossa amostra, é quem analisa os dados que vai interpretar os resultados, e sob determinadas regras estabelecidas verificar o que é necessário efetuar para manter ou melhorar os resultados por exemplo da fiabilidade ou disponibilidade do equipamento.

Ao analisarmos séries temporais estas podem revelar tendências, cujas causas e formas podem ser diversas (Murteira, 1993):

- Causas relacionadas com a variação da população alvo em estudo;
- Causas relacionadas com a eficiência. Por exemplo, eficiência de um equipamento, alterada através de manutenção.
- Causas relacionadas com a qualidade e com a quantidade dos meios existentes.

Montgomery & Runger (2003) referem que a aplicação das cartas de controlo permite eliminar os desperdícios em indústrias e na reprodução de um mesmo objeto, o que conduz a uma maior produtividade, decréscimo dos custos de produção e aumento da capacidade de produção.

Pereira & Requeijo (2012) referem que o processo produtivo que utiliza cartas de controlo é um processo em mudança em que, numa primeira fase, se recolhem dados que são ordenados e agrupados para posterior cálculo dos limites de controlo. Na segunda fase, já com o processo sob controlo estatístico, efetua-se a sua monitorização. Assim, no controlo da condição de funcionamento de um equipamento pode ser aplicado um processo semelhante, em que se segue o mesmo padrão de raciocínio.

Agostinho (2011) utiliza o controlo estatístico de processos, para controlo de produtos, para dados auto-correlacionados e não normais, baseando as cartas de controlo nos resíduos dos modelos e erros de previsão respetivos. Aplicou ainda as cartas para pequenas produções e as multivariadas de

*Hotteling*. Estas, com a modificação necessária e preconizada nesta metodologia, podem ser aplicadas em equipamentos.

Palma (2006) refere as cartas, *CUSUM*, *EWMA* e as Cartas Multivariadas como um método de controlo para variáveis, medidas através de sensores, que permite a deteção e diagnóstico de avarias. Refere, ainda, as cartas multivariadas como sendo as melhores para determinar eventuais correlações entre as variáveis.

O volume de dados recolhidos depende das características dos métodos estatísticos utilizados e do número de variáveis (Pereira, 2011).

“Processo” é qualquer combinação de máquinas, ferramentas, métodos, materiais e colaboradores para atingir as qualidades desejadas para produtos ou serviços.” (Juran *et al*, 1974).

“Controlo “é o processo de gestão visando estabelecer e cumprir as normas.”(Juran *et al*, 1974)

“Um processo em controlo estatístico significa que está estável, previsível, consistente e que se deve manter assim.” (Wise & Fair, 1998). Um equipamento, sob controlo de condição, também se pode considerar que está estável e é expectável que, a sua operação, seja concordante com os resultados pretendidos.

“Um processo fora de controlo é instável, imprevisível, inconsistente e que muda.” (Wise & Fair, 1998). Ou seja, este conceito num equipamento poderá refletir-se numa avaria catastrófica.

Castillo (2002) refere que o próprio objetivo do seu livro não é monitorizar um processo, mas sim o ajustamento de um processo utilizando os métodos de *Engineering Process Control (EPC)*. Diz também que o *EPC* não é um concorrente do *SPC*, mas que ambos são necessários nos processos industriais. Na presente dissertação optou-se por aplicar as cartas de controlo modificadas na monitorização de equipamentos.

Ao utilizarmos as cartas de controlo para monitorização de variáveis características de funcionamento de equipamentos, estamos a contribuir para um sistema de Manutenção *Lean*. Este emagrecimento verifica-se através de uma redução das atividades ao essencialmente necessário, reduzindo os custos diretos e indiretos (Lampreia & Parreira, 2011).

As cartas de controlo estatístico aplicadas a equipamentos são uma mais-valia e uma extensão da utilização destas metodologias. Poder-se-ia aplicar as cartas originais diretamente aos equipamentos, mas o seu *output* não seria o mais adequado, pois não estaríamos a considerar os limites impostos à máquina, nem pelo fabricante e nem pelo eventual normativo existente, o que conduziria, na maior parte dos casos, a falsos alarmes. Assim, na primeira fase, em que são estabelecidos os parâmetros de funcionamento dum processo ou máquina, utilizam-se as cartas de controlo originais diretamente. Na segunda fase, para monitorização, aplicam-se as cartas de controlo modificadas que serão apresentadas a partir do ponto 3.4.

Na presente investigação e na metodologia proposta neste capítulo, os limites não dependem, exclusivamente, da amostra mas dos limites definidos pelos fabricantes e por normativos característicos do tipo de equipamento a monitorizar. Esta nova formulação, para o cálculo dos limites de controlo, está inteiramente relacionada com a modificação das cartas de controlo propostas na metodologia.

### 3.1.2 As Cartas de Controlo Modificadas Aplicadas em Manutenção Condicionada

A metodologia<sup>1</sup> que se propõe e que será desenvolvida em 3.4 e 3.5, consta na aplicação das cartas de controlo estatístico para monitorizar as variáveis dos sistemas reparáveis, considerando as duas situações de dados independentes e dados Auto correlacionados, é a seguinte:

1. Selecionar o equipamento e variáveis a monitorizar.
2. Determinar os limites definidos pela Norma.
3. Verificar a correlação entre as variáveis a estudar.
4. Decidir se se deve efetuar um estudo multivariado ou univariado.
5. Recolher dados, definindo a frequência de recolha de dados.
6. Aplicar as cartas *Short Run* se a amostra for inferior a 100 para dados univariados e inferior a 200 para dados multivariados, senão, aplicar cartas para amostras grandes.
7. Quando o equipamento se encontra sem avarias, verificar se os dados são independentes, usando a *FACE* (Função de Auto-correlação Estimada) e da *FACPE* (Função de Auto-correlação Parcial Estimada).
8. Construir as cartas de controlo tradicionais (cartas *X* e *MR*) e verificar a estabilidade do equipamento, a normalidade dos dados e estimar a média e variância para dados univariados ou o vetor média e matriz covariância para dados multivariados, no caso de se verificar auto-correlação. Modelar o processo com os modelos *ARIMA*, se se verificarem dados auto-correlacionados.
9. Utilizar os erros de previsão do modelo ajustado, para a segunda fase, se os dados forem auto-correlacionados.
10. Recolher dados, definindo a frequência de recolha de dados.
11. Utilizar cartas multivariadas modificadas e cartas univariadas modificadas para monitorizar o processo.
  - Definir a alteração que se pretende detetar no valor médio da variável característica do sistema.
  - Estimar os dois limites para controlar o valor médio, ou seja, o limite de controlo (*LSC*) e o limite de aviso (*LA*).
  - Estabelecer regras de intervenção no sistema. Sugerem-se as seguintes:
    - a. No caso de um sistema reparável:
      - Regra 1 - Proceder a uma intervenção para despistar alguma situação anómala quando existem *d* pontos consecutivos acima de *LA*.
      - Regra 2 - Proceder a uma intervenção de manutenção quando existem *g* pontos consecutivos acima de *LSC*.
    - b. No caso de um sistema não reparável:
      - Regra 1 – igual ao sistema reparável.
      - Regra 3 - Se existirem *g* observações consecutivas acima do *LSC*, substituir o equipamento.

Para esquematizar a metodologia, tal como Ledolter & Burril (1999) referem, foram elaborados esquemas que representam a sequência de procedimentos de tratamento e análise dos dados.

<sup>1</sup> Esta metodologia, está apresentada de forma genérica. Esta será desenvolvida mais à frente para amostras superiores e inferiores a 200.

**FASE 1**

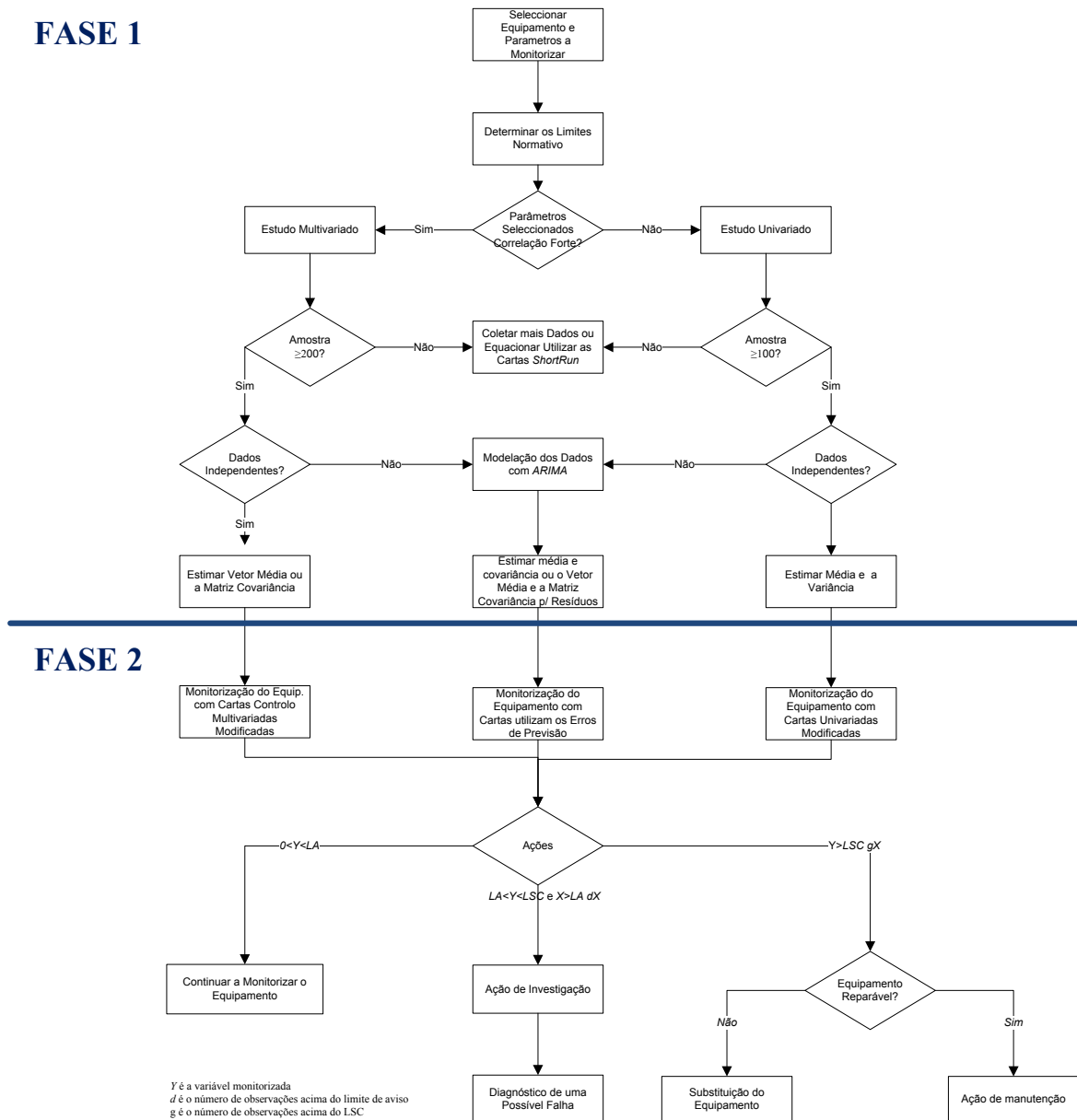


Figura 3.1 Metodologia de aplicação das cartas de controlo modificadas em manutenção condicionada

À semelhança da norma ISO 8258:1991, podemos representar graficamente as regras da metodologia, Figura 3.2. Na referida Figura a Regra 1 aparece duas vezes para mostrar que quando se diz observações acima de *LA*, estas podem estar igualmente acima do *LSC*. As regras 2 e 3 consoante um sistema ou equipamento for reparável ou não reparável, apresentam-se graficamente de forma idêntica, mas as ações a tomar são diferentes.

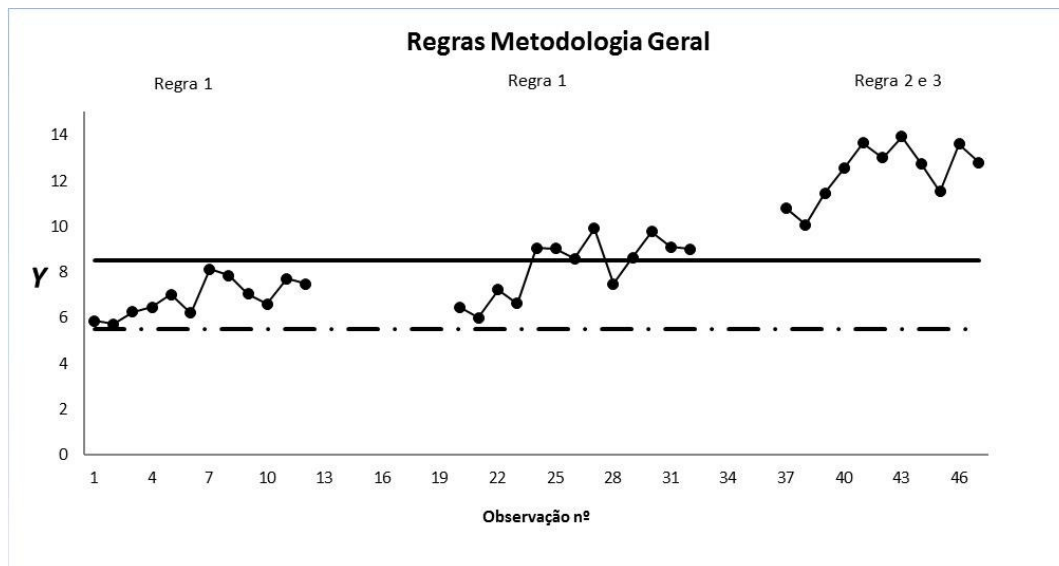


Figura 3.2 Regras para a intervenção

### 3.2 Monitorização da Condição com Cartas de Controlo Modificadas - Fase 1

As cartas de controlo tradicionais ou de Shewhart têm sido até hoje as mais utilizadas, porque oferecem uma maior simplicidade de construção e detetam facilmente grandes *shifts*. No entanto só utilizam a informação mais recente e por isso são lentas a detetar pequenos *shifts* (Pereira & Requeijo, 2012).

Tradicionalmente distinguem-se cartas de controlo para variáveis (quando a característica da qualidade está expressa por uma variável aleatória contínua) e cartas de controlo para atributos, no caso de qualidade estar expressa por uma variável qualitativa. No primeiro caso consideram-se duas cartas associadas: uma para controlo da localização e outra para controlo da variabilidade (Pereira & Requeijo, 2012).

O tipo de cartas existente para controlo das variáveis e atributos está representado na Figura 3.3.

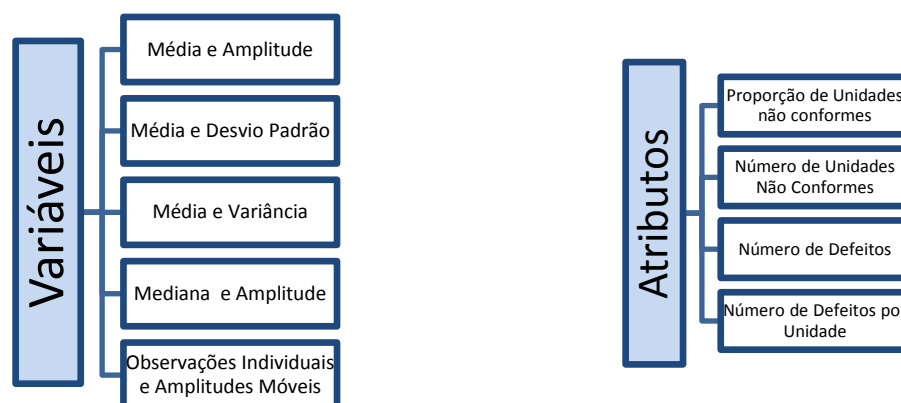


Figura 3.3 Tipo de cartas de controlo tradicionais (Adaptado de: Barbosa, 2012)

Tal como sucede num processo, num equipamento, os dados podem ser extraídos utilizando amostras ou observações individuais. Nesta investigação utilizar-se-ão as observações individuais, sendo apresentados dois tipos de cartas: a carta de Observações Individuais e Amplitude Móvel, a

Carta da Média e a Carta da Amplitude. Somente a Carta das Observações Individuais e Amplitude Móvel terá aplicação prática.

As regras de deteção de causas especiais de variação nas cartas de controlo são, de acordo com ISO8258:1991, Figura 3.4.

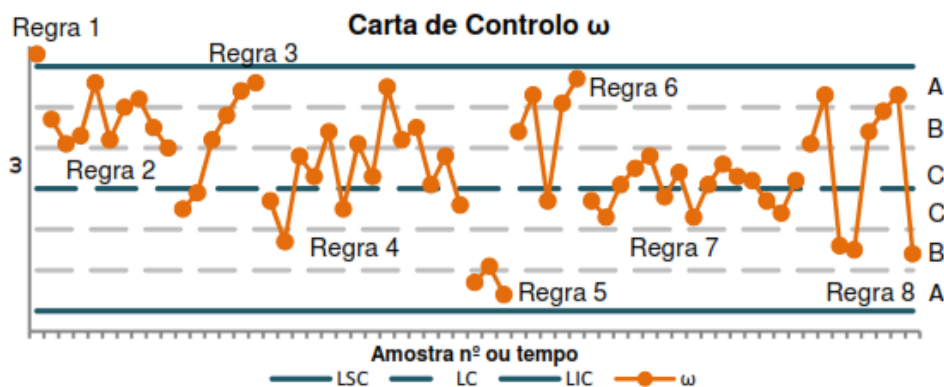


Figura 3.4 Regras de deteção de causas especiais (Fonte de: Agostinho, 2001)

- Regra 1 - Um ponto fora dos limites de controlo ( $LC \pm 3\sigma$ ).
- Regra 2 - Nove pontos consecutivos na zona C ou acima da na zona C no mesmo lado da linha central.
- Regra 3 - Seis pontos consecutivos no sentido ascendente ou descendente.
- Regra 4 - Catorze pontos consecutivos crescendo e decrescendo alternadamente.
- Regra 5 - Dois de três pontos consecutivos na zona A, do mesmo lado da linha central.
- Regra 6 - Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A, no mesmo lado da linha central.
- Regra 7 - Quinze pontos consecutivos na zona C, acima e abaixo da linha central.
- Regra 8 - Oito pontos consecutivos de ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C.

No entanto, por estarmos a efetuar a aplicação de cartas de controlo a equipamentos, estas não podem ser utilizadas da mesma forma, uma vez que os equipamentos estão em funcionamento, e poderá existir uma degradação clara do seu funcionamento no tempo. Desta forma, logo na primeira fase, para definir os parâmetros de funcionamento do equipamento devemos ter em conta os limites de funcionamento para a característica do equipamento escolhido para o estudo. Para isso, baseamos-nos nos limites definidos pelo fabricante, instituição em causa e por normativos em vigor.

### 3.2.1 Cartas de Controlo Univariadas Tradicionais

#### 3.2.1.1 Cartas de Controlo de Observações Individuais e Amplitude Móvel

Nesta dissertação serão referidas apenas as cartas para observações individuais, devido ao tipo de dados recolhidos dos equipamentos que vão ser considerados no capítulo 4 e 5 e que correspondem às características definidas por Montgomery (2012). Assim, se estivermos perante observações individuais, serão utilizadas as cartas de controlo para observação individual ( $X$ ) e amplitude móvel ( $MR$ ) (Wise & Fair, 1998).

Embora este tipo de carta não seja tão sensível como a da média, pode ser aplicada aos equipamentos em estudo. Por vezes, poderá ser a mais indicada, pois evita falsos alarmes devido aos subgrupos de amostras e limites especificados (Juran *et al*, 1974).

Neste tipo de cartas não é possível calcular a dispersão do processo pois somente existem observações individuais. Desta forma consideram-se amostras sequenciais para calcular a amplitude móvel, obtendo-se amplitudes móveis com ( $n=2$ ):

$$|X_2 - X_1|, |X_3 - X_2|, \dots, |X_m - X_{m-1}| \quad (3.1)$$

A linha central (LC) é definida pela média dos  $m$  valores.

$$LC_X = \bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i \quad (3.2)$$

A linha central da carta de  $MR$  é definida pela média de  $MR$  ( $m-1$ ) amplitudes móveis:

$$LC_{MR} = \overline{MR} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} MR_i \quad (3.3)$$

Se não se conhecer os parâmetros do processo utiliza-se o estimador de  $\sigma$ ,  $\frac{\overline{MR}}{d_2}$ . Sendo os limites de controlo definidos pelas seguintes equações:

$$LSC_X = \bar{X} + 3\sigma_X = \bar{X} + \frac{3\overline{MR}}{d_2} \quad (3.4)$$

$$LIC_X = \bar{X} - 3\sigma_X = \bar{X} - \frac{3\overline{MR}}{d_2} \quad (3.5)$$

$$LSC_{MR} = D_4 \overline{MR} \quad (3.6)$$

$$LIC_{MR} = D_3 \overline{MR} \quad (3.7)$$

Tabela 3.1 Limites de Controlo da Carta Observações Individuais e Amplitude Móvel (Pereira & Requeijo, 2012)

	Carta de Observações Individuais	Carta da Amplitude
LSC	$LSC_X = \bar{X} + \frac{3\overline{MR}}{d_2}$	$LSC_{MR} = D_4 \overline{MR}$
LC	$LC_X = \bar{X}$	$LC_{MR} = \overline{MR}$
LIC	$LIC_X = \bar{X} - \frac{3\overline{MR}}{d_2}$	$LIC_{MR} = D_3 \overline{MR}$

$d_2$ ,  $D_3$  e  $D_4$  dependem somente da dimensão da amostra, e constam do Anexo I (Montgomery, 2012).

Não se conhecem aplicações destas cartas a equipamentos. Somente foram encontradas aplicações em outras áreas que não a produção industrial, como seja o acompanhamento do estado de saúde de pacientes, nomeadamente em acompanhamento de doenças respiratórias crónicas, em que são construídas cartas de controlo com limites variáveis em que é possível visualizar a evolução da doença (Correia, 2010).

### 3.2.1.2 Cartas de Controlo da Média e da Amplitude

De forma a aplicar as cartas da média e da amplitude devem ser calculados para cada amostra a média e a amplitude (Saniga, 1991).

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} \quad (3.8)$$

$$R_i = X_{max} + X_{min} \quad (3.9)$$

A amplitude não é recomendável porque ou se perde muita da informação sobre a variabilidade da amostra uma vez que esta é reduzida a dois valores extremos (Fonseca, 2001).

Quando os parâmetros do processo são desconhecidos, os limites de controlo são calculados através da média global ( $\bar{X}$ ) e da amplitude móvel ( $\bar{R}$ ), são utilizadas as equações seguintes:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{X}_i}{k} \quad (3.10)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k} \quad (3.11)$$

$k$  -É o número de amostras.

$n$  -É a dimensão da amostra.

$\bar{R}$  -É a amplitude da amostra.

$i$  -Índice da amostra

$\bar{X}$  -É a média da amostra.

Na definição da carta da média os limites de controlo são calculados por  $\mu \pm 3\sigma_{\bar{X}}$ , onde  $\sigma_{\bar{X}}$  é o desvio padrão da amostra representado por:

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.12)$$

Se a média e o desvio padrão forem desconhecidos, estes devem ser estimados pela média e amplitude. Os limites de controlo da carta da media são estimados por  $\bar{X} \pm \frac{\bar{R}}{d_2}$ , e são:

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{X} + 3\sigma_{\bar{X}} = \bar{X} + \frac{3\sigma}{\sqrt{n}} = \bar{X} + \frac{3\bar{R}}{d_2\sqrt{n}} = \bar{X} + A_2\bar{R} \quad (3.13)$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{X} - 3\sigma_{\bar{X}} = \bar{X} - \frac{3\sigma}{\sqrt{n}} = \bar{X} - \frac{3\bar{R}}{d_2\sqrt{n}} = \bar{X} - A_2\bar{R} \quad (3.14)$$

$A_2$  e  $d_2$  dependem apenas dos valores da amostra (Anexo I).

Os limites da carta da amplitude são especificados pela expressão  $\mu_R \pm 3\sigma_R$  ( $\sigma_R = d_3\sigma$ ). Se se considerar o desvio padrão da amplitude desconhecido, este pode ser estimado através das amostras, e os limites são:

$$LSC_R = \bar{R} + 3\hat{\sigma}_R = \bar{R} + 3d_3\hat{\sigma} = \bar{R} + 3d_3\frac{\bar{R}}{d_2} = \bar{R}\left(1 + 3\frac{d_3}{d_2}\right) = D_4\bar{R} \quad (3.15)$$

$$LIC_R = \bar{R} - 3\hat{\sigma}_R = \bar{R} - 3d_3\hat{\sigma} = \bar{R} - 3d_3\frac{\bar{R}}{d_2} = \bar{R}\left(1 - 3\frac{d_3}{d_2}\right) = D_3\bar{R} \quad (3.16)$$

Os valores de  $D_3$  e  $D_4$  dependem também da dimensão da amostra, e podem ser consultadas no anexo I (Montgomery, 2012).

Tabela 3.2 Limites de Controle da Carta da Média e da Amplitude (Pereira & Requeijo, 2012)

	Carta da Média	Carta da Amplitude
LSC	$LSC_{\bar{X}} = \bar{X} + A_2\bar{R}$	$LSC_R = D_4\bar{R}$
LC	$LC = \bar{X}$	$LC = \bar{R}$
LIC	$LIC_{\bar{X}} = \bar{X} - A_2\bar{R}$	$LIC_R = D_3\bar{R}$

Como os limites da média são baseados na amplitude, o primeiro gráfico a analisar será o da amplitude, considerando que o equipamento se encontra em condições normais. Para o caso de acompanhamento de um equipamento, se for detetada uma anomalia, a causa deve ser determinada e eliminada. Se na primeira fase, ocorrer a presença de *outliers* e os dados forem independentes, estes devem ser eliminados para que se possam definir corretamente os parâmetros do processo. Se não forem independentes outros métodos podem ser aplicados e estão presentes no ponto 3.4. Então,  $\bar{X}$  e  $\bar{R}$  e os respetivos limites são recalculados, se, mesmo assim, ainda existirem valores fora dos limites deveremos reiniciar o método.

De referir que alguns autores sugerem algumas alterações a estas cartas de forma a melhorar a deteção de *outliers* como é o caso de Tadikamalla & Popescu (2007).

Como na presente dissertação são utilizadas observações individuais, estas cartas não serão aplicadas.

De acordo com Dias *et al* (2009) a carta do desvio padrão foi referida como passível de ser aplicada com o objetivo de monitorizar sistemas reparáveis. Com este tipo de cartas será possível estimar, para uma primeira fase do controlo de condição num sistema reparável, o desvio padrão referente a dados de vibração. Os dados de vibração vão ser o tipo de parâmetro alvo de maior estudo nesta dissertação.

### 3.2.2 Cartas de Controle Multivariadas Tradicionais

O erro do Tipo I é de 0,27%, isto é a probabilidade de rejeitar a hipótese de que o processo está fora de controle (probabilidade de falso alarme). Mas se existirem duas variáveis para controlar, a probabilidade de um ponto estar simultaneamente fora dos limites de controle é de  $0,0027 \times 0,0027 = 0,0000729$ , considerando que ambas as variáveis estão sob controle estatístico.

A probabilidade de um ponto pertencer ao intervalo compreendido pelos limites de controle é de 99,999271%  $((1-0,0027)(1-0,0027)=0,99999271)$ .

A qualidade dum carta multivariada é a correlação de duas ou mais variáveis, no entanto com o aumento do número de variáveis pode também aumentar o erro (Senouci *et al.*, 2009).

O erro do tipo I, para  $p$  variáveis independentes, onde  $\alpha_i$  é o risco do tipo I para a variável  $i$ , é dado por:

$$\alpha = P(\text{erro do tipo I}) = 1 - \prod_{i=1}^p (1 - \alpha_i) \quad (3.17)$$

A probabilidade de simultaneamente todos os pontos das  $p$  variáveis pertencerem aos intervalos definidos pelos limites de controle é dada por:

$$P(\text{ponto } p \text{ dentro dos limites de controle}) = \prod_{i=1}^p (1 - \alpha_i) \quad (3.18)$$

Se as  $p$  características em estudo da qualidade não forem independentes, tal como para as cartas univariadas, as expressões acima não são válidas, pelo que se torna necessário efetuar o estudo com os resíduos como será apresentado à frente. No caso de  $p = 2$ , a situação pode ser apresentada pelo gráfico da Figura 3.5. Neste caso os processos encontram-se controlados estatisticamente se todos os pontos se encontrarem no interior da região definida por uma elipse. Se as variáveis forem independentes a direção dos eixos da elipse coincide com a direção dos eixos das variáveis, esta situação não ocorre se as variáveis são correlacionadas. A este gráfico chama-se de *elipse de controle*, Figura 3.5.

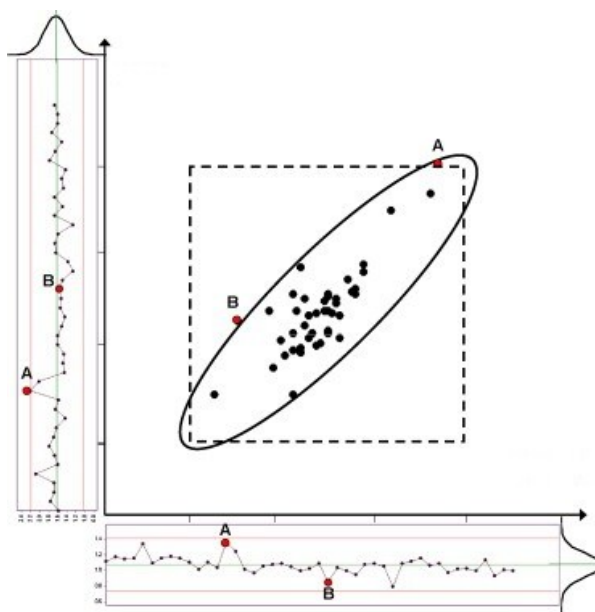


Figura 3.5 Elipse de Controle (Fonte de: Sciencedirect, 2013)

A desvantagem deste método é que somente pode controlar duas variáveis ( $p=2$ ).

A interpretação das cartas de controlo multivariadas é mais difícil do que a das univariadas, uma vez que é necessário identificar a variável responsável pela situação de fora de controlo.

Assumindo que a distribuição conjunta das variáveis é uma distribuição normal multivariada  $N_p(\mu, \Sigma)$ , com vetor média  $\mu' = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)$  e matriz das covariâncias  $\Sigma$ , as variáveis  $X_1, X_2, \dots, X_p$ , são independentes e identicamente distribuídas com distribuições normais (Pereira & Requeijo, 2012).

Ao construir as cartas multivariadas tradicionais, tal como nas cartas univariadas tradicionais, são consideradas duas fases: a Fase 1 e a Fase 2 (Chenouri & Variyath, 2010).

Na Fase 1 (Pereira & Requeijo, 2012):

- Após a especificação dos parâmetros de funcionamento, determinam-se os limites de controlo e verifica-se se os parâmetros se encontram sob controlo estatístico;
- Os parâmetros  $\mu$  e  $\Sigma$  não são conhecidos, e são estimados com os dados disponíveis quando o processo se considerar sob controlo estatístico;
- As estimativas dos parâmetros não são independentes dos dados recolhidos.

A Fase 2 será desenvolvida em 3.4.

Consideremos a Fase 1 do *SPC* e o *MEC (Monitoring Equipment Condition)* Multivariado, para controlo do vetor média. Neste caso, o funcionamento do equipamento é controlado por uma carta  $T^2$ , recomendando-se, no caso de duas variáveis ( $p=2$ ), 100 medições no mínimo. Quando o número de variáveis for superior ( $p > 2$ ) deve ser consultada a Tabela 3.3 em que é sugerida a dimensão  $m$  da sub-amostra em função do número  $p$  de variáveis (Lowry & Montgomery, 1995) (Pereira & Requeijo, 2012). Se o funcionamento do equipamento for estável, pode estimar-se o vetor média e a matriz das covariâncias do processo.

Tabela 3.3 Exemplo de valor de  $m$ -amostras a recolher (Fonte de: Lowry & Montgomery, 1995)

Nº Var $p$	Dimensão da Amostra $n$			
	1	3	5	10
2	100	75	50	20
3	150	75	50	25
4	150	75	50	25
10	250	150	75	50

Os autores Lowry & Montgomery (1995), que são considerados conservadores, referem as dimensões das amostras na Tabela 3.3 como as suficientes para cartas multivariadas. Pereira & Requeijo (2012) sugerem uma forma de cálculo para obter um valor de  $m$  mais fidedigno, usando a expressão seguinte:

$$\frac{800p}{3(n-1)} \leq m \leq \frac{400p}{n-1} \quad (3.19)$$

Para observações individuais o intervalo é:

$$180p \leq m \leq 300p \quad (3.20)$$

Na Fase 2 do *SPC* multivariado, existem dois momentos importantes: um que se inicia imediatamente a seguir à Fase 1 e outro mais à frente. No primeiro período da Fase 2, o processo é controlado com a carta  $T^2$  cujos limites são definidos com as observações da Fase 1. No segundo período, se o processo se encontrar sob controlo estatístico, é utilizada a carta  $\chi^2$ , cujos limites dependem das  $p$  variáveis e do nível de significância  $\alpha$  (Pereira & Requeijo, 2012).

Dadas as características dos dados e dos equipamentos sob estudo na presente dissertação apenas se aplicou um tipo de carta a seguir à Fase 1. Existem cartas multivariadas baseadas em Médias de Amostras e cartas baseadas em Observações Individuais, na presente dissertação, somente as cartas de Observações Individuais foram utilizadas na vertente tradicional, especial e para pequenas amostras.

### 3.2.2.1 Controlo do Vetor Média

Fixado um certo volume de dados, no controlo da média do processo vão ser consideradas duas situações associadas, respetivamente, às Fases 1 e 2. Tal como no estudo univariado são consideradas apenas observações individuais.

Na Fase 1 do controlo estatístico do processo, o vetor média é controlado com a carta  $T^2$ , sendo verificada a estabilidade do processo e, neste caso, a estabilidade do equipamento para o qual são estimados os limites de controlo. Na Fase 2, os dados recolhidos serão monitorizados com a carta *Hotteling*  $T^2$  e os limites de controlo  $T^2$  serão calculados em função do número de amostras e dos parâmetros calculados na Fase 1. Estabilizado o processo, estimam-se o vetor média e a matriz de covariância (Lampreia, 2012a).

As cartas de controlo  $T^2$ , tanto da Fase 1 como da Fase 2, podem ser construídas quando possuímos mais que uma variável. Para iniciar o estudo existe um determinado número de amostras ou de observações que são individuais ( $n=1$ ). Dada a especificidade da aplicação das cartas nesta investigação, somente as cartas multivariadas tradicionais para observações individuais serão abordadas.

#### Dados Independentes

Quando se observam  $p$  variáveis e estas são independentes, o modelo a considerar é:  $X_{ij} = \mu_j + \varepsilon_{ij}$  onde  $X_{ij}$  é uma variável que representa a observação  $i$  para a variável  $j$ ,  $\mu_j$  é a média do processo para a variável  $j$  e  $\varepsilon_{ij}$  são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (*iid*) com distribuição normal de média 0 e desvio-padrão  $\sigma_\varepsilon = 1$  (ruído branco). Em síntese:  $X_{ij} \sim N(\mu_j, \sigma^2)$  com  $\mu_j = E(X_{ij}) = E(\mu_j + \varepsilon_{ij}) = \mu_j$ .

Na Fase 1, são recolhidas  $m$  observações individuais  $X_{jk}$  ( $j=1,2,\dots,p$  e  $k=1,2,\dots,m$ ), para as quais são calculadas a média da amostra,  $\bar{X}_j$ , a variância,  $S_j^2$  e a covariância,  $S_{jh}$ . Baseado nestas estatísticas, obtêm-se o vetor média  $\bar{X}$  - expressão (3.21) - e a matriz covariância  $S$ , expressão (3.22) (Faraz *et al*, 2013).

$$\bar{X} = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_p)^T \quad (3.21)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{1p} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{2p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ S_{p1} & S_{p2} & S_{p3} & \dots & S_{pp} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Tanto para a Fase 1 como para a Fase 2 utilizam-se as cartas  $T$ , baseados na estatística, definida para cada  $k$  por :

$$(T^2)_k = (X_k - \bar{X})^T S^{-1} (X_k - \bar{X}) \quad (3.23)$$

O vetor  $\bar{X}$  e a matriz  $S$  são calculados utilizando os dados recolhidos na Fase 1. Os limites  $LIC$  e  $LSC$  para ambas as fases são estabelecidos na Tabela 3.4.

Na Tabela 3.4,  $\beta_{\alpha, p/2; (m-p-1)/2}$  é o percentil à direita, para uma probabilidade  $\alpha$ , da distribuição Beta com os parâmetros  $p/2$ ,  $(m-p-1)$  e  $F_{\alpha, p; m-p}$  é o percentil à direita, para uma probabilidade  $\alpha$ , da distribuição de Fisher com  $p$  e  $(m-p)$  graus de liberdade, respetivamente numerador e denominador.

Na Fase 1, os parâmetros das  $p$  características da qualidade são desconhecidos, sendo então estimados com base nos dados recolhidos. A regra prática para as cartas univariadas de Shewhart é considerar as últimas 100 observações na Fase 1. Mas este valor pode variar, dependendo dos autores, sendo que para as cartas multivariadas pode ter um valor mais elevado. Pereira & Requeijo (2012) sugerem  $m$  observações individuais satisfazendo a condição  $180p \leq m \leq 300p$ .

Tabela 3.4 Limites de controlo para a carta  $T^2$  (Fonte de: Pereira & Requeijo, 2012)

Carta	$LIC$	$LSC$
Fase 1	0	$\frac{(m-1)^2}{m} \beta_{\alpha, p/2; (m-p-1)/2}$
Fase 2	0	$\frac{p(m+1)(m-1)}{m(m-p)} F_{\alpha, p; m-p}$

### Dados Auto-correlacionados

O caso correspondente a dados auto-correlacionados será desenvolvido detalhadamente no ponto 3.3; no entanto é aqui apresentado, de forma parcial, a sua aplicação na Fase 1 do processo. Em síntese: para dados auto-correlacionados, recorre-se aos modelos  $ARIMA$ , utilizando-se nesta fase os resíduos do respetivo ajustamento por um modelo dessa família. Esses resíduos são:  $e_t = X_t - \hat{X}_t$ , em que  $\hat{X}_t$  é o valor ajustado pelo modelo escolhido e  $X_t$  o verdadeiro valor, observado no período  $t$ . Desta forma, a carta  $T^2$  é construída. A média e o desvio padrão são também estimados de acordo

com estes modelos, sendo a média do processo estimada conforme as equação (3.24) quando o processo é modelado respectivamente por um modelo  $AR(p)$  ou  $MA(p)$  (Lampreia *et al*, 2012a).

$$E(X) = \mu = \frac{\xi}{1 - \sum_{j=1}^p \phi_j} \quad (3.24)$$

### 3.3 Auto-correlação dos Dados

Quando se inicia o estudo para eventualmente aplicar o controle estatístico de um processo ou no presente caso, a equipamentos, deve ser testada a aleatoriedade, a normalidade dos dados e a independência dos dados.

A existência de correlação não implica necessariamente casualidade, ou seja não implica que exista uma relação causal entre as variáveis observadas (Murteira, 1993).

No caso de existirem dados não aleatórios isso deve-se à correlação serial entre observações consecutivas em tempos diferentes e à existência de populações misturadas. Os métodos utilizados para esta verificação costumam ser o teste das sequências, o teste modificado do quadrado médio das diferenças sucessivas e o teste das sequências ascendentes e descendentes. (Pereira & Requeijo, 2012). Nesta investigação considera-se que os dados são aleatórios, pelo que os testes referidos não serão definidos nem aplicados.

#### 3.3.1 Independência dos Dados

Quando se inicia o estudo de uma determinada variável, deve ser verificada a sua independência. Quando referimos que os dados são independentes quer dizer que não existe nenhuma correlação significativa entre as variáveis. Ou seja, a variável  $X$  no instante  $t$  não depende do valor no instante  $(t-1)$ , nem dum outro instante intervalado com  $k$  instantes  $(t-k)$ .

Para verificar a eventual existência de auto-correlação pode ser avaliada pela utilização das funções de Auto-Correlação ( $FAC$ ) e de Auto-Correlação Parcial ( $FACP$ ) (Pereira & Requeijo, 2012).

##### 3.3.1.1 Função de Auto-correlação

Em alguns processos industriais, ou em variáveis características de funcionamento de alguns equipamentos, os dados podem estar auto-correlacionados, o que se manifesta quando se verifica uma correlação entre as sucessivas observações ou intervalada de  $k$  instantes. É chamado de auto-correlação de desfaseamento  $k$  ("lag  $k$ ") à correlação de duas observações intervaladas dum instante  $k$ . Esta auto-correlação define-se através do coeficiente de correlação  $\rho_k$  (Castillo, 2002). O resultado obtido pelo coeficiente de auto-correlação  $\rho_k$ , para  $k=0, 1, 2, \dots$ , é chamado de função de auto-correlação ( $FAC$ ) (Requeijo, 2003).

$$\rho_k = \frac{Cov(X_t, X_{t+k})}{Var(X)} = \frac{Y_k}{Y_0}, k=0, 1, 2, \dots \quad (3.25)$$

Na equação anterior as variáveis são:

$Cov(X_t, X_{t+k})$  - Covariância das observações intervaladas por  $k$  instantes.

$Var(X)$  - Variância de  $X$ .

$Y_k$  - Auto-covariância de desfasamento  $k$ .

$Y_0$  - Auto-covariância de desfasamento  $k=0$  ou variância de  $X$ .

Na Figura 3.6 é apresentada a Função de Auto-correlação Estimada (*FACE*), onde existe auto-correlação significativa dos dados. Uma observação, no instante  $t$ , referida à variável  $X$  é, para a situação de dados auto-correlacionados, dada por  $X_t = \mu_t + \varepsilon_t$ , onde  $\mu_t$  é a média do processo no instante  $t$ , e  $\varepsilon$  é o erro (resíduo) nesse instante (Pereira & Requeijo, 2012).

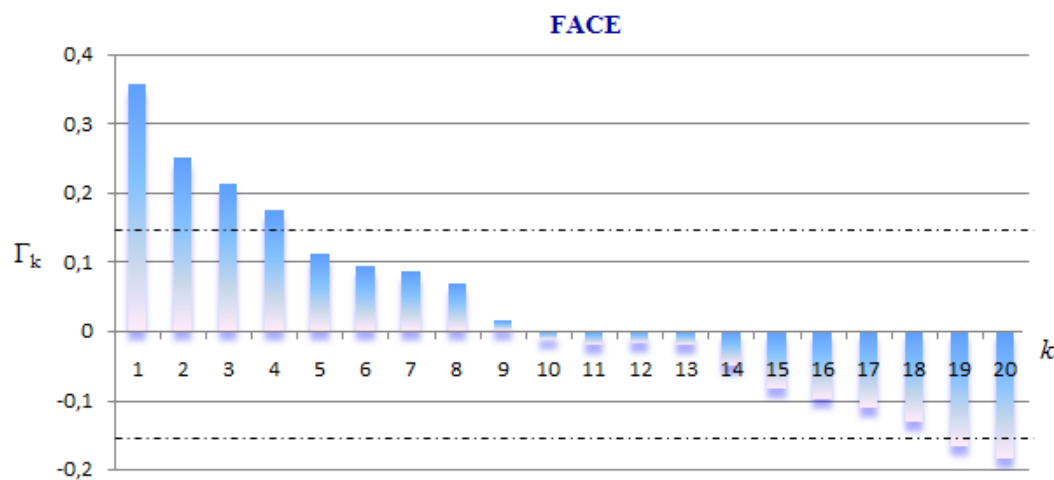


Figura 3.6 Função de Auto-Correlação Estimada (Adaptado de Pereira & Requeijo, 2012)

Se as séries temporais mostram uma correlação positiva, demonstram que existe um desenvolvimento no processo, “*it is moving*” (Wheeler, 1995). Esta alteração ou desenvolvimento depende em que momento o registo de dados é efetuado. Em alguns casos pode indicar uma falha ou defeito de um determinado elemento que está a ser monitorizado.

Para mais informação sobre a função de auto-correlação deve ser consultado Pereira & Requeijo (2012).

### 3.3.1.2 Função de Auto-correlação Parcial

Se o processo é modelado com um modelo *AR*, a função de auto-correlação teórica começa a decrescer numa dada ordem de desfasamento, mas nunca atinge o valor zero. Mas no modelo *MA* a função de auto-correlação teórica anula-se a partir de determinada ordem de desfasamento. A performance de *FAC* dificulta a escolha do melhor modelo para descrever o processo, sendo baseado em séries temporais. Com base nesta situação surge a Função de Auto-correlação Parcial (*FACP*)

A auto-correlação parcial com um lag  $k$  é definida como sendo a correlação entre  $X_t$  e  $X_{t+k}$  com efeito sobre as observações removidas ( $X_{t+1}, X_{t+2}, \dots, X_{t+k-1}$ ).  $\phi_{kk}$  vai ser o coeficiente de auto-correlação de ordem  $k$ . Aos valores de  $\phi_{kk}$  para  $k=1, 2, \dots$  é chamada de Função de Auto-correlação (*FAC*).

Para os modelos  $AR(p)$  (auto-regressivo de ordem  $p$ ), a auto-correlação parcial é calculada com a equação Yule-Walker, equação 3.26. (Montgomery *et al*, 1990) A Figura 3.7 representa a Função Auto-correlação Parcial Estimada (*FACPE*) (Pereira & Requeijo, 2012).

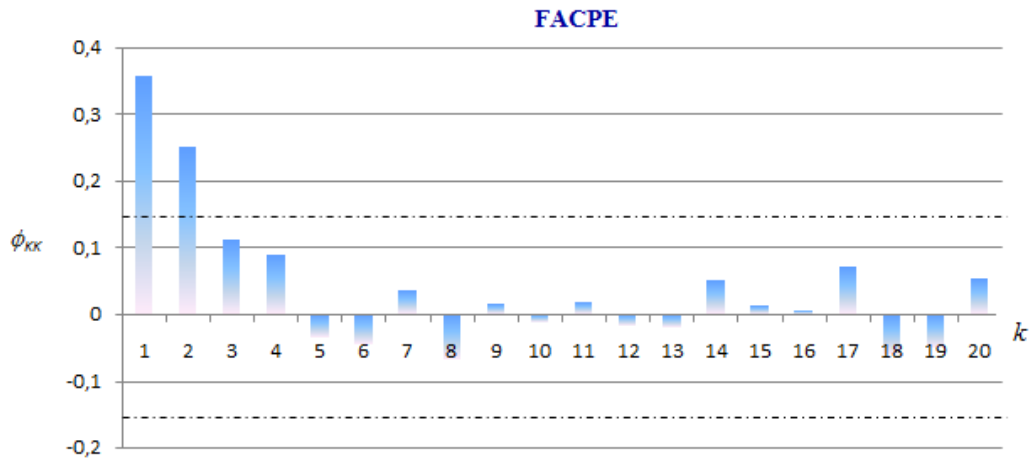


Figura 3.7 Função de Auto-Correlação Parcial Estimada (Adaptado de Pereira & Requeijo, 2012)

$$\begin{pmatrix} 1 & \rho_k & \rho_2 & \cdots \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \rho_{k-3} & \cdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{k1} \\ \phi_{k2} \\ \vdots \\ \phi_{kk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_k \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

Ou em notação matricial:

$$\phi_k = P_k^{-1} \rho_k \quad (3.27)$$

Para mais informação sobre esta função deve ser consultado Requeijo (2003) e Pereira & Requeijo (2012).

### 3.3.2 Cartas de Controle de Processos com Dados Auto-correlacionados

Nesta investigação assume-se que os dados são independentes, pelo que essa hipótese deve ser previamente testada. A existência de auto-correlações significativas nos dados pode causar erros no cálculo dos limites de controlo. Porque o risco  $\alpha$  aumenta e consequentemente  $ARL_{Em\ Controlo}$  decresce, e podem aparecer vários falsos alarmes, pelo que o processo é considerado fora de controlo sem razões técnicas comprovadas.

Se estivermos na presença de dados auto-correlacionados, são possíveis três soluções. A primeira utilizar as cartas de *Shewhart*, *CUSUM*, ou de *EWMA* com limites de controlo modificados, que não foi utilizada. A segunda que consiste em ajustar o modelo matemático que melhor se ajusta os dados auto-correlacionados, utilizando nas cartas de pré-controlo os resíduos, e nas cartas de controlo os erros de previsão, sendo esta a metodologia usada neste trabalho. A terceira solução consiste na implementação de cartas específicas, em que se incluem a carta *MCEWMA* (“Moving Centre-line *EWMA*”), com ou sem índices adicionais, se inclui, a carta *EWMAST* (*EWMA* para processos estacionários), em que os limites de controlo da carta *EWMA* convencional são

modificados através da função  $\rho_k$ . Esta última também não será aplicada (Pereira & Requeijo, 2012).

Considera-se que a determinação do modelo matemático que melhor se ajusta aos dados auto-correlacionados é a metodologia mais adequada ao presente estudo. Utilizando os mesmos dados, mas transformados, no caso de existência de *outliers* numa primeira fase, estes não são eliminados mas sim substituídos pelos valores esperados.

### 3.3.2.1 Modelação do Processo – Modelo de ARIMA

Em presença de auto-correlação significativa, não é possível aplicar as cartas base, referidas na primeira parte deste capítulo, uma vez que a condição de independência dos dados é violada.

De forma a modelar um processo com dados auto-correlacionados, é fundamental estudar as séries temporais para determinar o modelo que melhor se ajusta. Pereira & Requeijo (2012) desenvolveram o modelo *ARIMA* (*Auto-regressive Integrated Moving Range*), que tem sido aplicado a processos com dados auto-correlacionados. Um modelo *ARIMA* é definido por Box *et al* (1994):

$$\Phi_p(B)\nabla^d = X_t = \Theta_q(B)\varepsilon_t \quad (3.28)$$

Onde

$$\Phi_p(B) = (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) \quad (3.29)$$

$$\Theta_q(B) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) \quad (3.30)$$

$$B = \frac{X_{t-1}}{X_t} \quad (3.31)$$

$$\nabla = \frac{X_t - X_{t-1}}{X_t} = 1 - B \quad (3.32)$$

Onde

$B$  - Operador de Lags (desfasamentos)

$\nabla$  - Operador de diferenças

$d$  - Ordem de diferenciação para tornar o processo estacionário

$X_t$  - Observação no instante  $t$

$\varepsilon_t$  - Ruído branco no instante  $t$  ( $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ )

$\Phi_p(B)$  - Polinomial auto-regressivo de ordem  $p$

$\Theta_q(B)$  - Polinomial de médias móveis de ordem  $p$

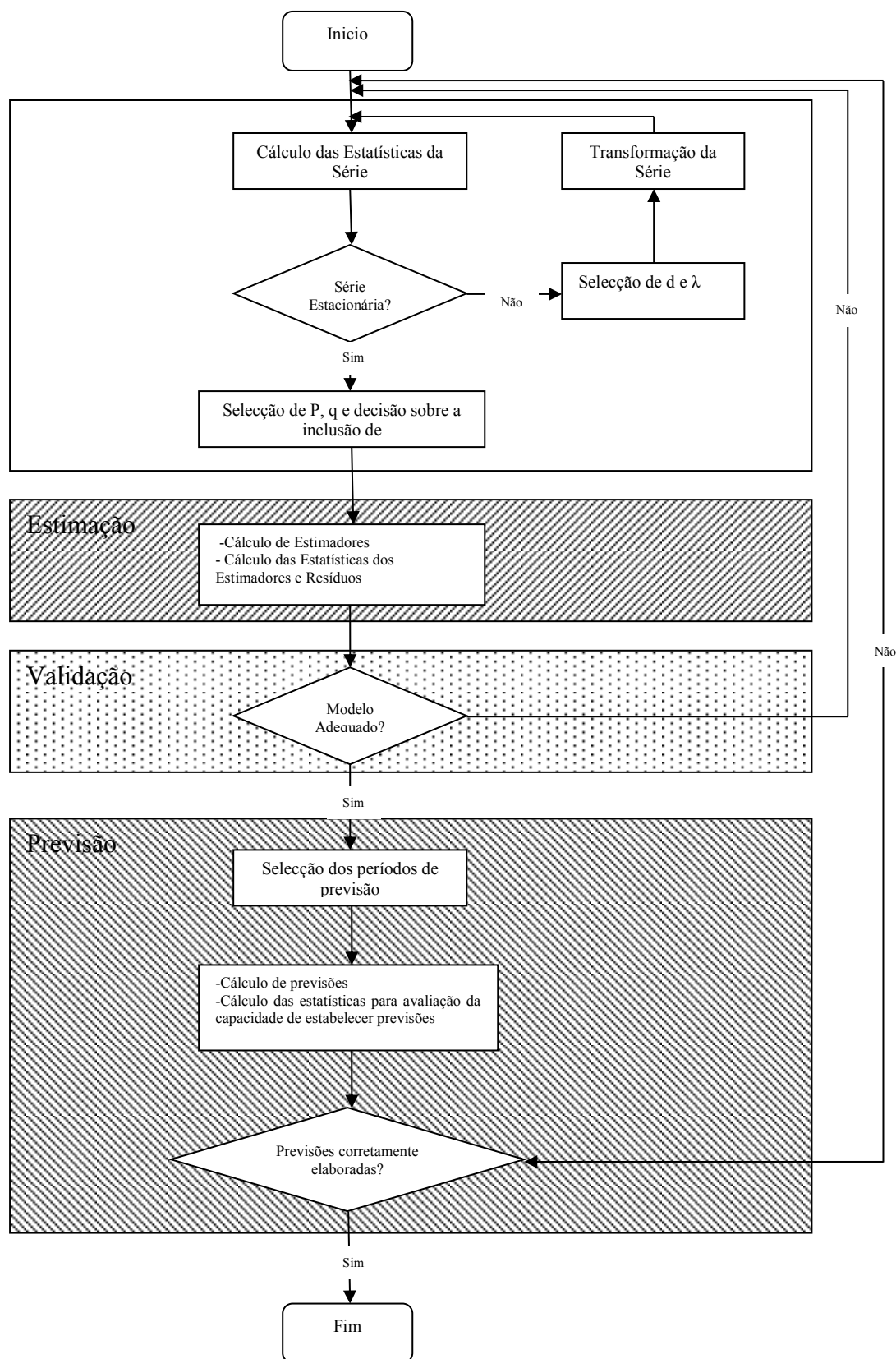


Figura 3.8 Sequência de aplicação do modelo *ARIMA* (Fonte: Pereira & Requeijo, 2012)

Num processo estacionário resulta uma distribuição que não se altera, em que a distribuição de  $N$  observações de um instante  $t$  ( $X_t, X_{t+1}, \dots, X_{t+N-1}$ ) tem as mesmas propriedades que a distribuição

de um *lag* no instante  $k$  ( $X_{t+k}, X_{t+k+1}, \dots, X_{t+k+N-1}$ ). Quando a condição anterior não existe, o processo é não estacionário. (Montgomery *et al*, 1990)

Quando o processo é estacionário, o ajustamento da série temporal é feito usando um modelo *ARMA* ( $p, q$ ). Se o processo não é estacionário é necessário a aplicação de um operador de diferenças para transformar a variável original  $X$  numa variável estacionária  $Y$ , no instante  $t$ , através de  $Y_t = \nabla^d X_t$ . Assim o processo com a variável  $Y$  pode ser ajustado para um modelo *ARMA* ( $p, q$ ).

Um modelo auto-regressivo de ordem  $p$  são chamados de modelos de *AR*( $p$ ) e os de ordem  $q$  são modelos de média móvel *MA* ( $q$ ). Se o modelo ajustado é adequado é possível calcular os resíduos,  $e_t$ , no instante  $t$ , com a utilização da diferença entre as características da qualidade nesse mesmo instante ( $X_t$ ) e o valor esperado  $X$  nesse mesmo instante  $\hat{X}_t$ , que para a Fase 1 é:

$$e_t = X_t - \hat{X}_t \quad (3.33)$$

Quando o modelo matemático na Fase 1 está definido é possível estimar a média e variância de um processo e calcular os valores dos instantes seguintes. Com este cálculo, é possível determinar os erros de previsão. O erro de previsão no instante  $i$  é determinado através da diferença entre a característica  $X$  e o instante  $X_i$ , e o valor estimado  $\hat{X}_i$ , para o mesmo instante, utilizando o modelo definido previamente:

$$e_i = X_i - \hat{X}_i \quad (3.34)$$

Para definir um modelo *ARIMA*, deve-se obedecer à sequência constante na Figura 3.8 (Pereira & Requeijo, 2012).

### 3.3.2.1.1 Identificação

No estágio da identificação, a primeira fase é verificar se o processo é estacionário. Esta verificação é efetuada através de análise gráfica  $t, X_t$ , que pode traduzir situações não estacionárias na média e/ou na variância do processo.

Quando estamos perante uma situação não estacionária o procedimento a seguir depende do parâmetro que sofre a alteração na série temporal. No caso da variância, o parâmetro de  $\lambda$  (Box & Cox, 1964) (Pereira & Requeijo, 2012) deve ser selecionado. No caso da média, o parâmetro  $d$  deve ser selecionado, sendo usado para sugerir a ordem de diferenciação a realizar.

Quando se transforma a variável original,  $X$  em  $Y_t = \nabla^d X_t$ , a análise gráfica  $(t, Y_t)$  deve revelar que a variável é estacionária para o processo.

Seguidamente determina-se o modelo *ARMA* ( $p, q$ ) que melhor se ajusta aos dados. Para realizar esta tarefa, é comparada a função estimada de auto-correlação, dada por  $r_k$ , com a função de auto-correlação teórica, dada por  $\rho_k$ , e a função auto-correlação parcial estimada dada por  $\hat{\phi}_{kk}$ , com a função de auto-correlação parcial teórica,  $\phi_{kk}$ . (Montgomery *et al*, 1990)

Box, *et al* (1994) apresenta a *FAC* e *FACP* dos modelos *AR*( $p$ ), *MA*( $q$ ) e *ARMA*( $p, q$ ).

Os vários tipos de modelos *ARIMA* apresentam-se de seguida (Montgomery *et al*, 1990):

**Modelo AR(p)**

O modelo  $AR(p)$  (Auto-regressivo de ordem  $p$ )

$$X_t = \xi + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t \quad (3.35)$$

$$E(X) = \mu = \frac{\xi}{1 - \sum_{j=1}^p \phi_j} \quad (3.36)$$

$$Var(X) = \gamma_0 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{1 - \sum_{j=1}^p \rho_j \phi_j} \quad (3.37)$$

**Modelo MA(q)**

O modelo  $MA(q)$  (Média Móvel com ordem  $q$ )

$$X_t = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3.38)$$

$$Var(X) = \gamma_0 = \sigma_\varepsilon^2 \sum_{j=0}^q \theta_j^2, \theta_0 = 1 \quad (3.39)$$

**Modelo ARMA(p,q)**

O Modelo Misto (Auto-regressivo e de Médias Móveis)

$$X_t = \xi + \phi_1 X_{t-1} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3.40)$$

$$E(X) = \mu = \frac{\xi}{1 - \sum_{j=1}^p \phi_j} \quad (3.41)$$

$$Var(X) = \gamma_0 = \sum_{j=1}^p \phi_j \gamma_j - \theta_1 \gamma_{X\varepsilon}(-1) - \dots - \theta_q \gamma_{X\varepsilon}(-q) + \sigma_\varepsilon^2 \quad (3.42)$$

Onde:

- $\sigma_\varepsilon^2$  - Variância do erro,  $\varepsilon$
- $\xi$  - Parâmetro para determinação da média do processo
- $\phi_j$  - Parâmetro de ordem  $j$  do modelo  $AR$  ou  $ARMA$
- $\theta_j$  - Parâmetro de ordem  $j$  do modelo  $MA$  ou  $ARMA$
- $\rho_j$  - Coeficiente de correlação de desfasamento ( $Lag$ ),  $j$
- $\gamma_j$  - Auto-covariância de desfasamento  $j$

Para determinar qual o melhor modelo que se adapta aos dados recolhidos de um processo, de acordo com o tipo de amostras, e o tipo de cartas a utilizar, o número de amostras necessárias

recolher inicialmente varia, e depende de autor para autor (Pereira & Requeijo, 2012). No capítulo 4, porque se utilizaram cartas multivariadas com quatro variáveis, considerou-se que 200 seria o número mínimo de amostras a recolher.

### 3.3.2.1.2 Estimação

No modelo *ARIMA*, a estimação é o próximo procedimento (Castillo, 2002). Nesta fase, são calculados os estimadores de parâmetros,  $\phi_j, \theta_j, \xi$  e  $\sigma_\varepsilon^2$ . A estimação dos parâmetros é efetuada com o método dos mínimos quadrados ou com o método da máxima verosimilhança. Ambos os métodos permitem obter um ajustamento, que minimiza a soma dos quadrados dos erros (Pereira & Requeijo, 2012)

### 3.3.3.1.3 Validação

Depois de obter  $\hat{\phi}_j, \hat{\theta}_j, \hat{\xi}$  e  $\hat{\sigma}_\varepsilon^2$  na estimação, é necessário validar a estimativa. Na fase da validação é necessário verificar as seguintes condições:

- Os resíduos do modelo estimado têm uma distribuição aproximadamente  $N(0, \hat{\sigma}_\varepsilon^2)$ .
- Modelo estacionário e invertível.
- Os coeficientes estimados são estatisticamente significativos e têm correlação baixa.
- Os coeficientes do modelo são representativos da série.
- Elevado nível de ajustamento comparado com outros modelos alternativos.

Na Tabela 3.5 encontram-se as características teóricas da *FAC* e da *FACP* para os diferentes modelos *ARIMA* (Montgomery *et al*, 1990)

Tabela 3.5 Características teóricas da *FAC* e da *FACP* para os modelos (Adaptado de: Montgomery *et al*, 1990)

Modelo	<i>FAC</i>	<i>FACP</i>
<i>AR</i> ( <i>p</i> )	Decréscimo exponencial a partir de determinada ordem de desfásamento.	Picos significativos até ao desfásamento <i>p</i> , <i>lag</i> ( <i>p</i> ) que indicam a ordem do modelo.
<i>MA</i> ( <i>q</i> )	Picos significativos até ao desfásamento <i>q</i> , <i>lag</i> <i>q</i> ) que indicarão a ordem do modelo.	Decréscimo exponencial a partir de determinada ordem de desfásamento.
<i>ARMA</i> ( <i>p,q</i> )	Decréscimo exponencial a partir de determinada ordem de desfásamento sem nunca atingir o valor zero, positivamente ou negativamente, ou alternando entre si.	

Para mais desenvolvimento do modelo *ARIMA* deve ser consultado Pereira & Requeijo (2012), nomeadamente no que diz respeito à fase de verificação.

### 3.3.3 Cartas Tradicionais Baseadas nos Resíduos

Uma vez ajustado um modelo aos dados e calculados os respetivos resíduos estes têm uma distribuição  $N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ , como se viu. Pelo que esses valores residuais devem ser controlados usando uma carta tradicional para a média e a variância, sendo possível estimar os respetivos parâmetros

associados a um dado instante  $t$ . A única diferença é que, se forem detetadas causas especiais de variação, os valores devem ser substituídos pelos valores esperados em vez de serem eliminados.

Num processo de controlo com subamostras relativa à variável  $X$ , a subamostra correspondente ao instante  $t$  é formada pelas variáveis  $X_{t1}, X_{t2}, \dots, X_{tm}$  - a que correspondem os resíduos do modelo ajustado  $e_{t1}, e_{t2}, \dots, e_{tm}$  aos quais são aplicáveis os procedimentos descritos, isto é sendo  $n$  a dimensão da subamostras sejam  $\bar{e}_t$ ,  $R_t$  e  $S_t$ , respetivamente a média, amplitude e desvio-padrão, calculados por:

$$\bar{e}_t = \frac{\sum_{i=1}^n e_{ti}}{n} \quad (3.43)$$

$$R_t = \max(e_{t1}, e_{t2}, \dots, e_{tm}) - \min(e_{t1}, e_{t2}, \dots, e_{tm}) \quad (3.44)$$

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_{ti} - \bar{e}_t)^2}{n-1}} \quad (3.45)$$

No caso de observações individuais, tanto no SPC como na *Monitoring Equipment Condition (MEC)*, a estatística considerada no instante  $t$  para controlar a média é o resíduo  $e_t$ , e a dispersão é controlada com a amplitude móvel, baseado em dois resíduos consecutivos:

$$MR_t = |e_t - e_{t-1}| \quad (3.46)$$

As cartas tradicionais que utilizam os resíduos são aplicadas na Fase 1 do processo, considerando  $m$  amostras de dimensão  $n$  ou  $N$  observações individuais. Com os valores de  $\bar{e}_t$ ,  $R_t$ ,  $S_t$  e  $MR_t$  os valores médios:  $\bar{e}$ ,  $\bar{R}$ ,  $\bar{S}$ ,  $\bar{e}$  e  $\overline{MR}$  são calculados:

$$\bar{e} = \frac{\sum_{t=1}^m \bar{e}_t}{m} \quad (3.47)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{t=1}^m R_t}{m} \quad (3.48)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{t=1}^m S_t}{m} \quad (3.49)$$

$$\bar{e} = \frac{\sum_{t=1}^N e_t}{N} \quad (3.50)$$

$$\overline{MR} = \frac{\sum_{t=2}^N MR_t}{N-1} \quad (3.51)$$

O quadro seguinte apresenta os limites de controlo (*LIC*, *LC* e *LSC*) para as cartas da média, desvio padrão, resíduos e amplitude móvel, para a Fase 1 do processo quando os dados são auto-correlacionados.

Tabela 3.6 Limites de Controle das Cartas de Shewhart baseadas nos resíduos (Adaptado de: Pereira &amp; Requeijo, 2012)

Carta	LIC	LC	LSC
Média ( $\bar{e}$ )	$-A_2\bar{R}$	0	$A_2\bar{R}$
Amplitude ( $R$ )	$D_3\bar{R}$	$\bar{R}$	$D_4\bar{R}$
Média ( $\bar{e}$ )	$-A_3\bar{S}$	0	$A_3\bar{S}$
Desvio Padrão ( $S$ )	$B_3\bar{S}$	$\bar{S}$	$B_4\bar{S}$
Resíduos ( $e$ )	$-3\overline{MR} / d_2$	0	$3\overline{MR} / d_2$
Média Móvel ( $MR$ )	$D_3\overline{MR}$	$\overline{MR}$	$D_4\overline{MR}$

A estimação dos parâmetros depende do modelo *ARIMA* que ajusta o processo. O desvio padrão dos resíduos para a carta da amplitude, do desvio padrão e da amplitude móvel pode ser calculado por:

$$\hat{\sigma}_e = \sigma_e = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (3.52)$$

$$\hat{\sigma}_e = \sigma_e = \frac{\bar{S}}{c_4} \quad (3.53)$$

$$\hat{\sigma}_e = \sigma_e = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (3.54)$$

Para um tratamento mais profundo deste tema, consultar Pereira & Requeijo (2012) e Montgomery *et al* (1990).

Ainda para este tipo de dados e em relação à segunda fase do processo/equipamento, será apresentada no ponto 3.4 a aplicação das cartas para os erros de previsão.

### 3.4 Monitorização de Equipamentos - Fase 2

Para controlar os parâmetros de funcionamento dos equipamentos, usando dados auto-correlacionados, para aplicar as cartas de Shewhart ou cartas especiais, univariadas ou multivariadas, devem ser utilizados os erros de previsão em vez dos dados recolhidos diretamente. Nesta dissertação as cartas de Shewhart não são aplicadas na segunda fase, pelo que o seu desenvolvimento não será efetuado.

Os erros de previsão do modelo ajustado são definidos por  $e_\tau(T)$ , calculados de acordo com definido em 3.3.

Os erros de previsão têm um valor esperado de zero para a média e uma variância  $Var(e_\tau(T))$ , que é função da variância dos  $\sigma_e^2$ , determinada na Fase 1.

Na Fase 2, quando os dados são auto-correlacionados, as cartas de Shewhart podem ser aplicadas baseadas nos erros de previsão.

As estatísticas representadas pelo gráfico são:  $\bar{e}_t$ ,  $R_t$ ,  $S_t$  e  $MR_t$ , nestas equações  $t$  representa os erros de previsão no instante  $t$  e não os resíduos. Na carta dos erros de previsão a estatística representada é o erro de previsão  $e_t(T)$ .

Na Fase 2 a monitorização do processo é efetuada da seguinte forma (Pereira & Requeijo, 2012):

- Monitorização dos dados de equipamento recolhidos *online*;
- Os parâmetros de funcionamento do equipamento são estimados na Fase 1;
- Os limites de controlo são determinados em função da estimativa dos parâmetros recolhidos na Fase 1;
- Os dados a recolher na monitorização são independentes, se auto-correlacionados utilizar as estatísticas equivalentes;
- Quando o número de observações for suficiente, consideram-se conhecidos os parâmetros de funcionamento do equipamento, sendo os limites de controlo determinados independentemente do número de dados recolhidos na Fase 1.

### 3.4.1 Cartas de Controlo Especiais Univariadas

Apesar das cartas tradicionais serem mais simples e continuarem a poder ser utilizadas, vamos optar por utilizar cartas mais sensíveis, que têm uma capacidade superior na deteção de pequenos *shifts* (aumentos e decréscimo). Estas cartas são cartas cumulativas no sentido em que em todos os seus pontos contêm a informação dos pontos anteriores e desse mesmo ponto (Juran *et al*, 1974).

As cartas de controlo especiais podem ser as cartas *CUSUM* (*Cumulative Sum*) e *EWMA* (*Exponentially Weighted Moving Average*), sendo designadas cartas de segunda fase. Estas cartas detetam valores fora dos limites de controlo para características da qualidade com uma distribuição Normal e dados independentes. Estas estatísticas têm ainda carácter recursivo ( $T_N = g(T_{N-1}, X_N, \dots)$ ).

#### 3.4.1.1 Cartas de Controlo CUSUM

As cartas *CUSUM* são um método gráfico para controlo das variações de uma determinada estatística cujos valores foram registados até ao instante,  $t$ . Pode-se dizer que as suas estatísticas têm “memória” ao contrário das cartas de Shewhart (Requeijo *et al*, 2012). As cartas *CUSUM* podem ser um método efetivo não só no controlo de qualidade, mas também na fiabilidade, uma vez que indicam ainda a tendências de falha e alterações ao funcionamento do equipamento (O’Connor & Kleyner, 2011). De referir, no entanto que a abordagem efetuada por O’Connor não é igual à efetuada no capítulo 4.

A avaliação do comportamento de uma estatística numa carta *CUSUM* pode ser efetuada por uma cadeia de Markov (Wheeler, 1995). A carta *CUSUM* utiliza o conceito de *V-mask* no controlo de qualidade que remonta a Banard nos anos 50. Mas como este método pode ser complexo, para facilitar a visualização utilizam-se duas cartas, uma para detetar os aumentos e outra para detetar o decréscimo da média do processo (Pereira & Requeijo, 2012).

As variáveis que alimentam este tipo de cartas são calculadas através dos dados recolhidos de um equipamento ou sistema e através dos parâmetros das cartas ( $k$  e  $h$ ) e do *Average Run Length* (*ARL*). O *ARL* representa o comportamento do equipamento em que é avaliada a performance da carta de controlo: deve ser o maior possível quando um equipamento está a funcionar sob controlo e o mais pequeno possível quando estiver fora de controlo (Montgomery, 2012).

As cartas *CUSUM* são mais sensíveis a pequenos *shifts* do que as cartas de Shewhart: da ordem de  $0,5 \sigma_{\bar{x}}$  a  $2 \sigma_{\bar{x}}$ , detetando os *shifts*, acima do último, cerca de duas vezes mais depressa. Devemos, no entanto ter a noção que podem ser muito lentas a detetar grandes *shifts*, se estes forem muito espaçados, ou se existirem *shifts* muito espaçados.

A carta *CUSUM* envolve uma seleção dos parâmetros  $k$  e  $h$ , para a curva de *ARL*, esta contempla dois pontos  $(0, L(0))$  e  $(\delta, L(\delta))$ , onde  $L(0)$  é o *ARL* pretendido quando o equipamento opera sob controlo estatístico ( $ARL_{EmControlo}$ ) e  $L(\delta)$  é o *ARL* depois da ocorrência de uma alteração  $\Delta = \delta \sigma_{\bar{x}}$  da média do processo ( $ARL_{ForadeControlo}$ ), Figura 3.9 (Ott *et al*, 2005).

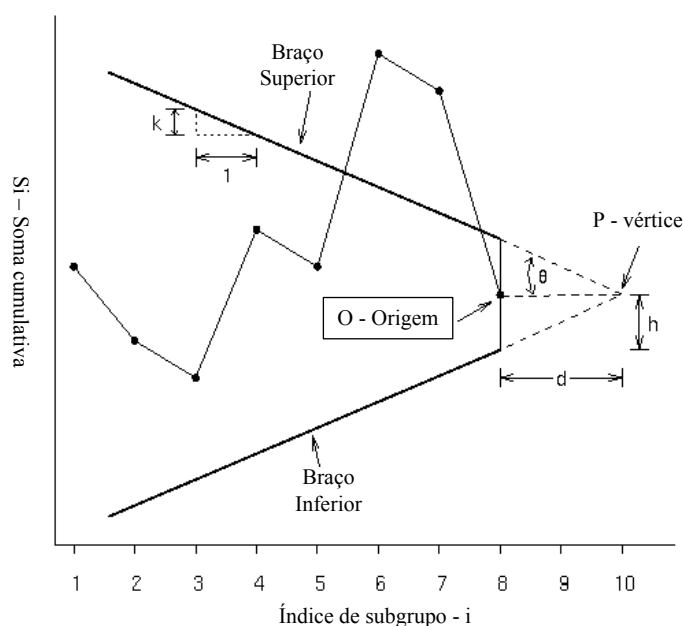


Figura 3.9 V-Mask (Fonte de: Ott *et al*, 2005).

Pereira & Requeijo (2012) sugerem a utilização de duas variáveis para deteção de aumentos e decréscimos da média do processo. Estas variáveis são calculadas com base nos valores amostrais da média, das estimativas da média e desvio padrão do processo e de um valor de referência que depende da alteração que se pretende detetar.

Nesta investigação são apresentadas duas alternativas, uma quando os dados são independentes e outra quando os dados são auto-correlacionados. E apresenta-se uma modificação da carta *CUSUM*, com o objetivo de detetar, rapidamente, o momento em que um parâmetro, escolhido para o estudo, tenha atingido um determinado limite pré-definido.

Ao definir a nova metodologia, em vez de modificar as cartas de controlo originais, poder-se-ia ter definido os limites de controlo com base nas amostras. Ao proceder desse modo, poderia incorrer-se no risco de intervir num equipamento antes de ter uma anomalia efetiva, aumentando os custos com a manutenção num valor significativo. Assim utilizou-se as cartas modificadas com a introdução da variável  $T_L$  (limite definido pelo fabricante ou em normativo).

**CUSUMM - Dados Independentes**

A carta *CUSUM* Modificada (*CUSUMM*), para controlar os máximos, é construída com base na soma acumulada,  $C$ , e para controlar os mínimos com a soma acumulada  $T$ , a registrar no gráfico de controle, que é definido respetivamente por:

$$C_t = \max(0, C_{t-1} + (Z_t - k)) ; C_0 = 0 \quad (3.55)$$

$$T_t = \min(0, T_{t-1} + (Z_t + k)); T_0 = 0 \quad (3.56)$$

Em que

$$Z_t = \left( (\bar{X}_t - T_L) / \sigma_{\bar{X}} \right) = \frac{\bar{X}_t - T_L}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (3.57)$$

$$\sigma_{\bar{X}} = \sigma / \sqrt{n} \quad (3.58)$$

$$\Delta = \delta \sigma_{\bar{X}} \quad (3.59)$$

$$k = \delta / 2 \quad (3.60)$$

$$T_L = (T_L)_{Norma} - \Delta_S \quad (3.61)$$

$$\Delta_S = \delta_1 \sigma \quad (3.62)$$

Nestas equações  $\bar{X}_t$  é a média da amostra  $t$ ,  $T_L$  o valor máximo de vibração admissível,  $\sigma$  o desvio padrão do processo,  $n$  a dimensão da amostra,  $Z_t$  a variável Normal reduzida referente a  $\bar{X}_t$ ,  $k$  o valor de referência,  $\delta_1$  uma constante e  $\Delta_S$  o fator de segurança (Requeijo *et al*, 2012).

A carta “*CUSUM* Modificada” é construída tendo em conta dois limites. Definindo-se dois tipos de controle. O primeiro funciona como aviso (alerta), designando-se por Limite de Aviso (*LA*). O segundo é o verdadeiro Limite de Controle (*LSC*). A determinação de *LA* e *LSC* é efetuada com o auxílio de ábacos desenvolvidos por Gan (1991), em função do valor de *ARL* (*Average Run Length*) para as duas situações e do valor de referência  $k$ . Para o presente estudo, serão considerados  $\alpha = 1\%$  ( $ARL = 100$ ) na definição de *LA* e  $\alpha = 0,2\%$  ( $ARL = 500$ ) na definição de *LSC*.

No capítulo 4 apresenta-se a aplicação da metodologia que se sugere para aplicação das cartas *CUSUM* modificadas, tanto para dados independentes como auto-correlacionados.

**CUSUMM - Dados Auto-correlacionados**

Quando os dados são auto-correlacionados, a carta *CUSUM* Modificada é construída com base na soma acumulada  $C$  definida pela equação (3.55), calculada agora em função dos erros de previsão  $e_t$ . Estes erros de previsão são estimados no instante  $\tau$  por  $e_\tau(T) = X_{T+\tau}(T) - \hat{X}_{T+\tau}(T)$ , em que  $X_{T+\tau}(T)$  é o valor nesse instante e  $\hat{X}_{T+\tau}(T)$  o valor previsto no instante  $\tau$ , previsão feita no instante atual  $T$  (coincidente com o final da Fase 1).

Dado que no cálculo dos valores de  $C$  usam-se aos erros de previsão, é necessário fazer a correspondente correção na determinação do valor de  $T_L$ , aqui definido nesta situação por  $T_L = (T_L)_{Norma} - \mu - \Delta_S$ , em que  $\mu$  é a média do processo estimada na Fase 1 (Requeijo *et al*, 2012).

- $\bar{X}_t$  - Média da Amostra
- $\mu$  - Valor inicial da média do processo
- $\sigma$  - Desvio padrão do processo
- $n$  - Dimensão da amostra
- $k$  - Valor de referência

A metade da carta com os valores de  $T$  permite detetar um decréscimo da média, e a metade que possui os valores de  $C$  permite representar o aumento da média duma das característica ou parâmetros de um processo ou equipamento.

Considerando  $h$  o limite da carta de controlo *CUSUM*, o equipamento está fora de controlo quando:

$$T_t < -h \quad (3.63)$$

$$C_t > h \quad (3.64)$$

Se houver alguma alteração no processo, devem ser calculados novos parâmetros de funcionamento, de forma a manter a capacidade de deteção da carta, para serem tomadas em ações em tempo útil.

A média pode ser calculada por:

$$\mu_{new} = \begin{cases} \mu + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \left( k + \frac{C_t}{N_C} \right), \text{if } C_t > h \\ \mu - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \left( k - \frac{T_t}{N_T} \right), \text{if } T_t < -h \end{cases} \quad (3.65)$$

Onde  $N_T$  e  $N_C$  designam os sucessivos períodos de números, sendo  $T$  e  $C$  são diferentes de zero.

O melhor valor para  $k$  é  $\delta/2$ , quando o parâmetro a controlar for a média, este será o valor utilizado na construção das cartas *CUSUM*. Para determinar  $h$  e  $k$  deve ser utilizado o ábaco respetivo no anexo II, em alternativa,  $h$  deve ser calculado em função da variação de  $\delta$  na média, para um  $ARL_{EmControlo}$ .

De referir que este tipo de cartas têm vindo a ser utilizados para controlar os cuidados médicos prestados a pacientes (Sibanda & Sibanda, 2007).

### 3.4.1.1.1 Carta CUSUMM - Metodologia

A metodologia que se propõe para aplicação das cartas de controle estatístico na monitorização da vibração de sistemas reparáveis, considerando as duas situações de dados independentes ou dados Auto correlacionados, é a seguinte:

1. Recolher dados, definindo a frequência de recolha.
2. Verificar se os dados são independentes, quando a eletrobomba se encontrava sem avarias, através da *FACE* e da *FACPE*.
3. Se os dados forem independentes, construir as cartas de controle tradicionais (cartas *X* e *MR*), verificar a estabilidade do processo, a normalidade dos dados e estimar os respetivos parâmetros (média e desvio padrão da vibração que se verifica na eletrobomba quando o sistema não apresenta avaria).
4. Se os dados forem auto-correlacionados, modelar os dados, recorrendo aos modelos *ARIMA*.

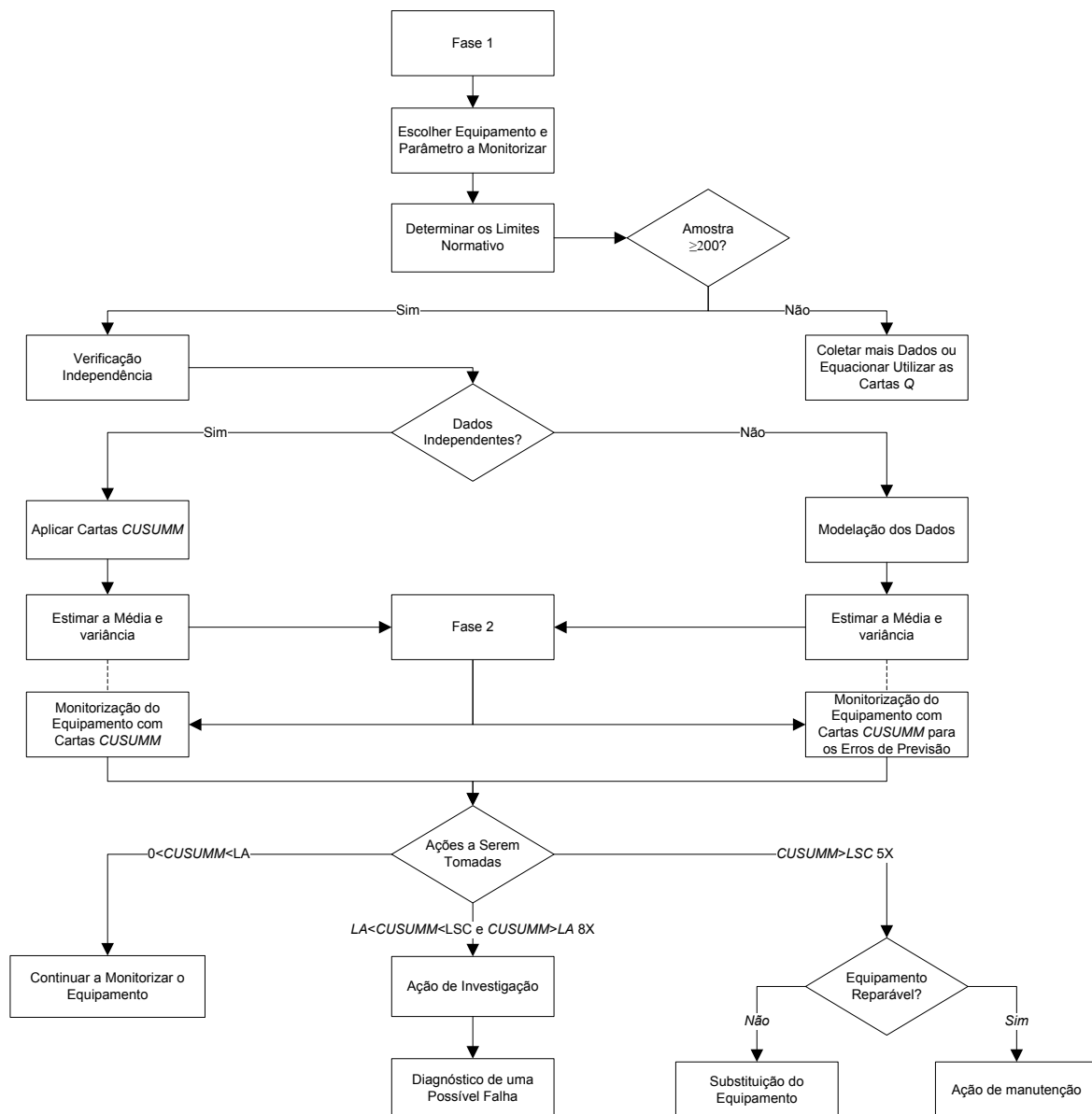


Figura 3.10 Metodologia de aplicação da carta de controle CUSUMM

5. Construir as cartas  $e-MR$  dos resíduos, verificar a estabilidade do processo e a normalidade dos resíduos. Estimar os parâmetros da vibração ou outra variável a estudar (média e desvio padrão).
6. Para monitorizar o valor da vibração do sistema, construir cartas  $CUSUM$  modificadas, recorrendo aos dados obtidos em medições posteriores à introdução dos diferentes estados de agravamento da avaria introduzida no equipamento: carta  $CUSUM$  modificada dos dados (para dados independentes); carta  $CUSUM$  modificada dos erros de previsão (para dados auto-correlacionados).
  - Definir, com base na Norma ISO 2372, o valor de vibração a partir do qual se deve intervir no sistema.
  - Definir o valor da alteração a detetar no valor médio do parâmetro selecionado dum do sistema.
  - Estimar os dois limites para controlar o valor médio do parâmetro a estudar, ou seja, o limite de controlo ( $LSC$ ) e o limite de aviso ( $LA$ ).
  - Estabelecer regras de intervenção no sistema. Sugerem-se as seguintes:
    - Proceder a uma intervenção para despistar alguma situação anómala quando existem 8 pontos consecutivos acima de  $LA$ .
    - Proceder a uma intervenção de manutenção quando existem 5 pontos consecutivos acima de  $LSC$ .
  - Antes de proceder à operação de investigação/manutenção analisar o espectro de frequências de forma a diagnosticar o tipo de avaria.

#### 3.4.1.2 Cartas de Controlo EWMA

A carta  $EWMA$  é tal como a carta  $CUSUM$  uma carta especial, que permite a rápida deteção de pequenos *shifts*, pois utiliza a informação anterior e a atual da performance do processo. Isto traduz-se, ainda, numa outra característica importante que é o fato destas cartas apenas detetarem alterações que sejam sustentadas no tempo, mostrando menos sensibilidade para alterações pontuais (Ott *et al*, 2005). Permite ainda, saber com mais certeza que os *shifts* detetados representam alterações genuínas ao estado do processo, enquanto para as cartas de Shewhart a situação equivalente deverá ser analisada com mais pormenor (Allen, 2006).

Estudos numéricos demonstram que a aplicação desta carta na indústria é particularmente positiva nas ações de arranque e curto espaço de funcionamento de um sistema (Zou & Tsung, 2010).

Os valores da estatística calculada são considerados independentes e identicamente distribuídos de com acordo com  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , possuem uma distribuição Normal, com média  $\mu$ , e uma variância de  $\sigma^2$ .

Tal como na carta  $EWMA$  para controlo da média,  $E$  é considerada uma variável exponencialmente amortecida (Eyvazian *et al*, 2008). A variável  $E$  para observações individuais tem as mesmas características que as cartas que controlam a média.

As cartas que não forem aqui desenvolvidas, como a da média e a da dispersão, é porque não são utilizadas nesta investigação.

Também são apresentadas duas alternativas, uma para dados independentes e outra para dados auto-correlacionados.

**EWMA - Dados Independentes**

A carta *EWMA* Modificada (*EWMA*) é construída com base na variável exponencialmente amortecida (Crowder, 1992),  $E$ , definida pela equação (3.66).

$$E_t = \max \left( 0, (1-\lambda) E_{t-1} + \lambda (\bar{X}_t - T_L) \right), \text{ com } 0 < \lambda < 1 \quad (3.66)$$

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

Os limites de aviso e de controle para esta carta são dados pelas equações (3.67) e (3.68) (Lampreia *et al*, 2012b).

$$LA_E = K_1 \sigma_E \quad (3.67)$$

$$LSC_E = K_2 \sigma_E \quad (3.68)$$

Em que

$$\sigma_E = \sigma_{\bar{X}} \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}} \quad (3.69)$$

Nestas equações  $\bar{X}_t$  é a média da amostra  $t$ ,  $T_L$  o valor máximo de vibração admissível,  $\sigma_E$  a variância da variável  $E$ ,  $n$  a dimensão da amostra,  $\lambda$  a constante de amortecimento,  $\Delta_S$  o fator de segurança e  $K_1$  e  $K_2$  valores determinados em função do valor de  $\lambda$  e do  $ARL$  (para  $LA$  e  $LSC$ ). Para determinar o valor da constante de amortecimento,  $\lambda$ , que conduz ao menor  $ARL_{ForadeControle}$ , convém variar o seu valor, e também a alteração da média  $\Delta = \delta \sigma_{\bar{X}}$  e observar os resultados. (Pereira & Requeijo, 2012)

Os valores de  $LA$  e  $LSC$  obtêm-se usando ábacos desenvolvidos por Crowder (1989), em função do valor de  $ARL$  (*Average Run Length*), que, por sua vez, depende da média e da variância do processo (Serel & Moskowitz, 2008). No presente estudo, tal como para as cartas *CUSUM* Modificadas serão considerados  $\alpha = 1\%$  ( $ARL = 100$ ) na definição de  $LA$  e  $\alpha = 0,2\%$  ( $ARL = 500$ ) na definição de  $LSC$ . Para além dos anteriores valores de  $ARL$  e  $\delta$ , que se constatou serem aplicáveis ao presente estudo, várias alterações da média podem ser consideradas, e Del Castillo e Montgomery (1994) comparam as alterações da média para valores entre os 0 e os 3, e desta forma concluíram que a carta *EWMA* é a que possui uma melhor performance quando o objetivo é detetar a alteração da média.

**EWMA - Dados Auto-correlacionados**

Quando os dados são auto-correlacionados, a carta *EWMA* Modificada é construída com base na variável exponencialmente amortecida,  $E$ , definida pela equação (3.67), calculada agora em função dos erros de previsão  $e_t$ . Os erros de previsão são estimados no instante  $\tau$  conforme na carta *CUSUM*.

Dado que no cálculo dos valores de  $E$  se usam os erros de previsão, é necessário fazer a correção correspondente na determinação do valor de  $T_L$ , aqui definido nesta situação por

$T_L = (T_L)_{Norma} - \mu - \Delta_S$ , em que  $\mu$  é a média do processo estimada na Fase 1. (Lampreia *et al*, 2012b)

Tabela 3.7 Cálculo da Média e do Desvio Padrão

	Amostras	Observações Individuais
$\mu_Y$	$\mu_{\bar{X}} = \mu$	$\mu_X = \mu$
$\sigma_Y^2$	$\sigma_{\bar{X}}^2 = \frac{\sigma^2}{n}$	$\sigma_X^2 = \sigma^2$

Em que:

$E_t$  - Média Móvel Exponencialmente Amortecida no instante  $t$ .

$\lambda$  - Constante de amortecimento.

$Y_t$  - Valor da variável  $Y$  no instante  $t$ .

$\sigma_E^2$  - Variância da variável  $E$ .

$\mu$  - Média do processo.

$\sigma^2$  - Variância do processo.

$E_0$  - Valor inicial da variável  $E$  de ( $E_0 = \mu_Y$ ).

$n$  - Dimensão da Amostra.

$\bar{X}_t$  - Média da amostra recolhida no instante  $t$ .

$X_t$  - Observação individual no instante  $t$ .

$K$  - Constante, nível de controle para determinar  $\lambda$  e o  $ARL_{EmControle}$ .

Para construir uma carta *EWMA* eficiente e eficaz, é necessário que os parâmetros  $\lambda$  e  $K$  sejam selecionados corretamente, considerando um  $ARL_{EmControle}$  e minimizando o  $ARL_{ForadeControle}$ , quando a média do processo se altera a partir de um determinado valor.

Para determinar os melhores valores de  $\lambda$  e  $K$ , em função de uma valor específico  $ARL_{EmControle}$  e uma média  $\Delta = \delta\sigma_{\bar{X}}$ , dos ábacos de Crowder (1989) são usados, Anexo II.

### 3.4.1.1.2 Carta *EWMA* - Metodologia

A metodologia que se propõe para aplicação das cartas de controle estatístico *EWMA* para monitorizar a vibração de sistemas reparáveis, considerando as duas situações de dados independentes ou dados auto-correlacionados, é a seguinte:

1. Recolher dados, com uma frequência de recolha de dados pré-definida.
2. Verificar se os dados são independentes, quando a eletrobomba se encontra sem avarias, através da *FACE* e da *FACPE*.
3. Se os dados forem independentes, construir as cartas de controle tradicionais (cartas  $X$  e  $MR$ ), verificar a estabilidade do processo, a Normalidade dos dados e estimar os seus

parâmetros (média e desvio padrão da vibração que se verifica na eletrobomba quando o sistema não apresenta avaria).

4. Se os dados forem auto-correlacionados, modelar os dados, recorrendo aos modelos *ARIMA*.
5. Construir as cartas *e-MR* dos resíduos, verificar a estabilidade do processo e a Normalidade dos resíduos, assim como estimar os parâmetros (média e desvio padrão) da vibração do sistema.

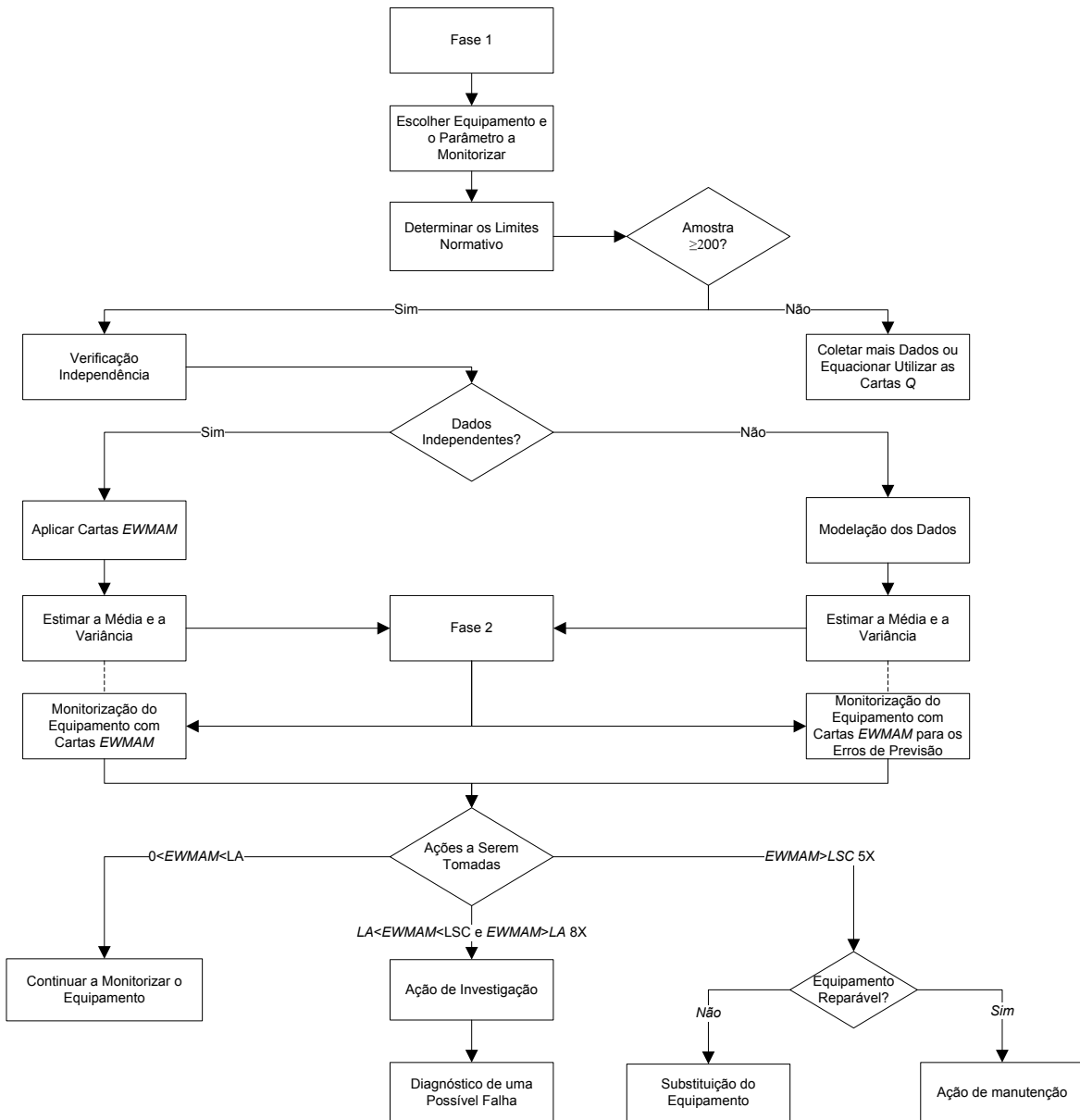


Figura 3.11 Metodologia de aplicação da carta de controle *EWMA*

6. Construir cartas *EWMA* modificadas, para monitorizar o valor da vibração do sistema; a carta *EWMA* modificada dos dados (para dados independentes); carta *EWMA* modificada dos erros de previsão (para dados auto-correlacionados).
  - Definir, com base na Norma ISO2372 e/ou outras, o valor de vibração (no caso das vibrações) ou outros a partir dos quais se deve intervir no sistema.
  - Definir a alteração que se pretende detetar do parâmetro a estudar do sistema.

- Estimar os dois limites do valor médio do parâmetro a estudar, ou seja, o limite de controlo ( $LSC$ ) e o limite de aviso ( $LA$ ).
- Estabelecer regras de intervenção no sistema. Sugerem-se as seguintes:
  - Proceder a uma intervenção para despistar alguma situação anómala quando existem 8 pontos consecutivos acima de  $LA$ .
  - Proceder a uma intervenção de manutenção quando existem 5 pontos consecutivos acima de  $LSC$ .
- Analisar o espetro de frequências de forma a diagnosticar o tipo de avaria, antes de proceder à operação de investigação/manutenção.

De referir que ao longo da apresentação das regras para intervenção no sistema, o número de observações necessárias para tomar ação varia de acordo com a sensibilidade verificada nas cartas e de acordo com a sensibilidade do autor desta dissertação. Os mesmos valores necessários para a intervenção podem ser ajustados de acordo com as exigências dos utilizadores.

### 3.4.2 Cartas de Controlo Tradicionais Multivariadas

Alguns processos envolvem medidas de características múltiplas cujas observações podem ser obtidas de diversas formas. Por exemplo numa turbina a gás as vibrações próprias e induzidas (por outra parte do corpo do equipamento), as temperaturas e pressões. Os diversos componentes destas características multivariadas podem ser medidos simultaneamente em cada equipamento idêntico e no mesmo estado (Hawkings, 1991), ou então podem ser medidas num mesmo instante.

Se existir uma necessidade de controlar vários parâmetros ao mesmo tempo, podemos determinar o real estado da máquina, utilizando cartas multivariadas. As cartas de controlo univariadas podem neste caso ser consideradas um modo extensivo às multivariadas, e como veremos mais à frente podem ser complementares na deteção de avarias. Nesta investigação vão ser propostas cartas univariadas e multivariadas para o tratamento dos dados dos equipamentos. (Pereira & Requeijo, 2002)

#### 3.4.2.1 Cartas de Controlo Multivariadas - $T^2$

##### $T^2$ Modificada - Dados Independentes

As estimações do vetor média e matriz covariância são realizadas na Fase 1, tal como foi referido em 3.2.

Na Fase 2, uma vez que o objetivo é a deteção atempada de uma situação de risco iminente. Uma tomada de ação é justificada somente quando o desvio de um determinado nível de vibração se regista. Nesse caso a estatística  $T^2$  deve ser modificada de acordo com o indicado em normativo ou pelo fabricante do equipamento.

A modificação da estatística  $T^2$  é baseada na variável  $j$ , para uma vibração máxima aceitável de  $T_L$ . Este valor é calculado em função dum nível máximo de vibração dado por normativo  $(T_L)_{Norma}$ , pelo desvio padrão e pelo fator de segurança  $k$  (assumindo uma distribuição Normal, é sugerido  $k=3$ ), como se segue:

$$(T_L)_j = ((T_L)_{Norma} - k\sigma)_j \quad (3.70)$$

A estatística  $T^2$  é então definida por:

$$(T^2)_k = (X_k^* - T_L)^T S^{-1} (X_k^* - T_L) \quad (3.71)$$

Onde

$$(X_k^* - T_L) = \max(0; X_k - T_L) \quad (3.72)$$

Para esta carta multivariada  $T^2$ , dois tipos de limite são definidos: Limite de Alerta ( $LA$ ), definido por  $\alpha_j = 1\%$  e limite superior de controlo ( $LSC$ ), definido para  $\alpha_j = 0,2\%$ . Para a segunda fase os valores para estes limites são calculados aplicando os dados na Tabela 3.4. (Lampreia *et al*, 2012) (Zhang & Chang, 2008)

### **$T^2$ Modificada-Dados Auto-correlacionados**

Aqui a estimação do vetor média e da matriz covariância é realizada na Fase 1 tal como para os dados independentes.

Para dados auto-correlacionados, as estatísticas  $T^2$  Modificadas ( $T^2M$ ) são definidas, utilizando o vetor  $e_k^*$ :

$$(T^2)_k = (e_k^*)^T S^{-1} (e_k^*) \quad (3.73)$$

$$e_k^* = \max(0; e_k - T_L - \mu) \quad (3.74)$$

Onde  $e_k$  é o vetor dos erros de previsão para o tempo  $k$ .

$$(T_L)_j = ((T_L)_{Norma} - k\sigma - \mu)_j \quad (3.75)$$

O limite de alerta e o limite superior de controlo são calculados conforme descrito na Tabela 3.4.

#### **3.4.2.1.1 Interpretação de Outliers de Dados Multivariados**

Quando se utiliza uma carta multivariada caso se verifique uma situação fora de controlo com registos fora dos limites, é possível que haja uma causa especial envolvida, causada por uma ou mais variáveis, ou então pela correlação entre as variáveis (Alfaro *et al*, 2009). Então torna-se imperativo descobrir quais as variáveis causais ou correlacionadas de forma a tomar as medidas de intervenção adequadas.

Em Pereira & Requeijo (2012) são definidos seis métodos para detetar as variáveis ou as correlações responsáveis:

- A estatística  $d$  (Runger *et al*, 1996) (Montgomery, 2012);
- Decomposição em componentes ortogonais de  $T^2$  (Mason *et al*, 1997);
- Cartas de controlo univariadas com  $p$  variáveis tendo os limites baseados nas desigualdades de Bonferroni (Alt, 1985);
- Decomposição em componentes principais de  $T^2$  (Jackson, 1980a, 1981b, 1981c);

- Cartas de controlo univariadas com limites de diagnóstico (Nedumaran & Pignatiello, 1998);
- Método do ponto crítico,  $C_{r,\alpha}$  (Hayter and Tsui, 1994).

Tal como é sugerido por Pereira & Requeijo (2012), nesta investigação apenas dois métodos são utilizados: a estatística  $d$  (representada abaixo), e a decomposição em componentes ortogonais. A primeira é utilizada a título de primeira aproximação, e a segunda permite o estudo sob os parâmetros obtidos, através das variáveis isoladas e através da correlação entre elas.

### **Método da Estatística $d$**

Pereira & Requeijo (2012) referem, com o objetivo de determinar as variáveis responsáveis pela situação fora de controlo, o método estatístico  $d$  para cada variável  $i$  é definido por:

$$d_i = T^2 - T_{(i)}^2, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (3.76)$$

Nesta equação a estatística  $T^2$  é calculada baseada nas variáveis  $p$  e  $T_{(i)}^2$ , que é calculada pela estatística *Hotelling* para  $(p-1)$  variáveis (baseado em todas as variáveis  $p$ , exceto a variável  $(i)$ ).

Uma variável contribui significativamente para uma situação fora de controlo quando:

$$d_i > \chi_{\alpha,1}^2 \quad (3.77)$$

### **Método de Decomposição em Componentes Ortogonais**

No caso de um processo multivariado, se tivermos um ponto fora dos limites de controlo, esta situação pode ser provocada por uma ou várias alterações dos parâmetros das características  $p$ , ou devido à alteração da correlação entre as variáveis, ou devido a ambas as situações. A melhor técnica para monitorizar esta situação é a decomposição em componentes ortogonais da estatística  $T^2$ .

O método de decomposição em componentes ortogonais da estatística  $T^2$  para as características  $p$  considera o vetor de  $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip})'$ , que refere as  $p$  características medidas no instante  $i$ . Quando o processo está sob controlo estatístico,  $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip}$  são independentes e  $X_i$  segue uma distribuição multivariada Normal com um vetor média  $\mu$  e uma matriz covariância:  $\sum(X \sim N_p(\mu, \sum))$ . Neste método  $T^2$  é decomposto em duas partes, a primeira  $T_{p-1}^2$  é a estatística  $T^2$  referente às primeiras variáveis  $(p-1)$ , e o segundo  $T_{p,1,2,\dots,p-1}^2$  é o componente  $p$  do vetor  $X_i$ , ajustado pela média e covariância da distribuição condicional  $X_p$  dado  $X_1, X_2, \dots, X_{p-1}$  (Pereira & Requeijo, 2012).

$$T^2 = T_{p-1}^2 + T_{p,1,2,\dots,p-1}^2 \quad (3.78)$$

As estatísticas  $T_{p-1}^2$  e  $T_{p,1,2,\dots,p-1}^2$ , no instante  $i$ , são definidas por:

$$(T_{p-1}^2)_i = (X_i^{(p-1)} - \bar{X}_i^{(p-1)})' S_{XX}^{-1} (X_i^{(p-1)} - \bar{X}_i^{(p-1)}) \quad (3.79)$$

$$(T_{p,1,2,\dots,p-1}^2)_i = \frac{(X_{ip} - \bar{X}_{p,1,2,\dots,p-1})^2}{S_{p,1,2,\dots,p-1}^2} \quad (3.80)$$

Onde

$$\bar{X}_{p,1,2,\dots,p-1} = \bar{X}_p + b_p' (X_i^{p-1} - \bar{X}_i^{p-1}) \quad (3.81)$$

$$b_p = S_{XX}^{-1} s_{xX} \quad (3.82)$$

$$S_{p,1,2,\dots,p-1}^2 = S_x^2 - s_{xX}' S_{XX}^{-1} s_{xX} \quad (3.83)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{XX} & s_{xX} \\ s_{xX}' & S_{XX} \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

Utilizando a decomposição da estatística de *Hotelling* em componentes ortogonais, considera-se  $T_{p-1}^2 = T_{p-2}^2 + T_{p-1,1,2,\dots,p-2}^2$ , e desta forma sucessivamente para as estatísticas  $T_{p-k}^2$ , resultando na equação geral:

$$T^2 = T_1^2 + T_{2,1}^2 + T_{3,1,2}^2 + T_{4,1,2,3}^2 + \dots + T_{p,1,2,\dots,p-1}^2 = T_1^2 + \sum_{j=1}^{p-1} T_{j+1,1,2,\dots,j}^2 \quad (3.85)$$

Onde

$$T_1^2 = \frac{(X_{i1} - \bar{X}_1)^2}{S_1^2} \quad (3.86)$$

Tabela 3.8 Decomposição de  $T^2$  em componentes ortogonais para  $p=3$

	Ordem das Variáveis			Decomposição em Componentes Ortogonais
	1ª	2ª	3ª	
Possibilidade 1	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$T_1^2 + T_{2,1}^2 + T_{3,1,2}^2$
Possibilidade 2	$X_1$	$X_3$	$X_2$	$T_1^2 + T_{3,1}^2 + T_{2,1,3}^2$
Possibilidade 3	$X_2$	$X_1$	$X_3$	$T_2^2 + T_{1,2}^2 + T_{3,2,1}^2$
Possibilidade 4	$X_2$	$X_3$	$X_1$	$T_2^2 + T_{3,2}^2 + T_{1,2,3}^2$
Possibilidade 5	$X_3$	$X_1$	$X_2$	$T_3^2 + T_{1,3}^2 + T_{2,3,1}^2$
Possibilidade 6	$X_3$	$X_2$	$X_1$	$T_3^2 + T_{2,3}^2 + T_{1,3,2}^2$

A equação (3.85) tem as seguintes propriedades (Pereira & Requeijo, 2012):

- ✓ A ordem dos termos condicionais não é única, depende da variável que é considerada como primeira, da que for considerada segunda e assim sucessivamente;
- ✓ É constituído por um termo incondicional,  $T_1^2$ , e por vários termos condicionais  $T_{j+1,1,2,\dots,j}^2 (j=1,2,\dots,p-1)$ .
- ✓ Existem  $p!$  combinações possíveis da decomposição da estatística  $T^2$  (ex: para  $p=3$ ), considerando as variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ , existem seis possibilidades de decomposição de  $T^2$ , ver Tabela 3.8.
- ✓ Todas as combinações devem estudadas.

Na interpretação de uma situação fora de controlo com este método, os valores dos termos condicionais e incondicionais devem ser comparados com os respetivos valores críticos. Com  $m$  observações recolhidas na Fase 1, os termos condicionais contribuem significativamente para uma situação fora de controlo quando  $T_{j+1,1,2,\dots,j}^2 > \frac{m+1}{m} F_{\alpha;1,m-1}$ .

A contribuição do termo incondicional é significativa quando  $T_j^2 > \frac{m+1}{m} F_{\alpha;1,m-1}$ .

O elevado número de combinações torna-se um inconveniente neste método, que é tanto maior quando maior for o número de variáveis. Uma forma rápida de reduzir o número de termos a estudar é (Pereira & Requeijo, 2012):

- Descobrir a diferença entre a estatística  $T^2$ , que mostra uma situação fora de controlo e os termos incondicionais ( $T^2 - T_1^2, T^2 - T_2^2, \dots, T^2 - T_p^2$ ).
- Comparar cada diferença entre  $T^2 - T_j^2$  e o valor crítico  $((m+1)/m)F_{\alpha;1,m-1}$ .
- Se  $(T^2 - T_j^2) > ((m+1)/m)F_{\alpha;1,m-1}$  considerar que os termos condicionais da decomposição não contribuem significativamente para uma situação fora de controlo, então não deve ser analisada.
- Se  $(T^2 - T_j^2) < ((m+1)/m)F_{\alpha;1,m-1}$ , considerar que os termos condicionais dessa decomposição, contribuem significativamente para as situações fora do controlo, então devem ser obrigatoriamente analisados.
- Todos os termos incondicionais devem ser analisados, comparando  $T_j^2$  com  $((m+1)/m)F_{\alpha;1,m-1}$ .

O valor de um termo incondicional,  $T_j^2$ , que apresenta um valor superior ao valor crítico, indica uma alteração na variável  $j$ . Se um termo condicional apresenta um valor superior ao valor crítico indica que há uma alteração na correlação entre as variáveis representadas nesse termo condicional (Pereira & Requeijo, 2012).

### 3.4.2.1.2 $T^2$ Modificada - Metodologia

Em primeiro lugar, mais uma vez, deve-se decidir quais as variáveis a utilizar e verificar quais são importantes para definir o estado do equipamento.

A independência é verificada e após isso a carta  $T^2$  deve ser aplicada definindo-se o vetor média e a matriz covariância. Se existir auto-correlação significativa, deve ser utilizado um modelo *ARIMA*, e

a carta  $T^2$  é aplicada utilizando os resíduos e estima-se assim o vetor média e a matriz covariância para os resíduos.

Na Fase 2 a carta  $T^2$  é utilizada para monitorizar o comportamento do equipamento. Mais uma vez a monitorização é efetuada desde a recolha do primeiro valor, mas as ações só serão tomadas mediante determinadas circunstâncias que devem ser baseadas em Normas Internacionais, limites do fabricante e imposições do utilizador. Na dissertação para os equipamentos de bordo de um navio foram efetuadas somente leituras, não induzindo anomalias que acelerariam a degradação dos equipamentos. Para o caso do protótipo apesar das anomalias induzidas, estas foram controladas de forma a não provocar a degradação total da eletrobomba.

A implementação da metodologia proposta pressupõe a utilização das cartas de controle  $T^2$  para monitorizar vibração em sistemas reparáveis, para dados independentes e auto-correlacionados, conforme se segue:

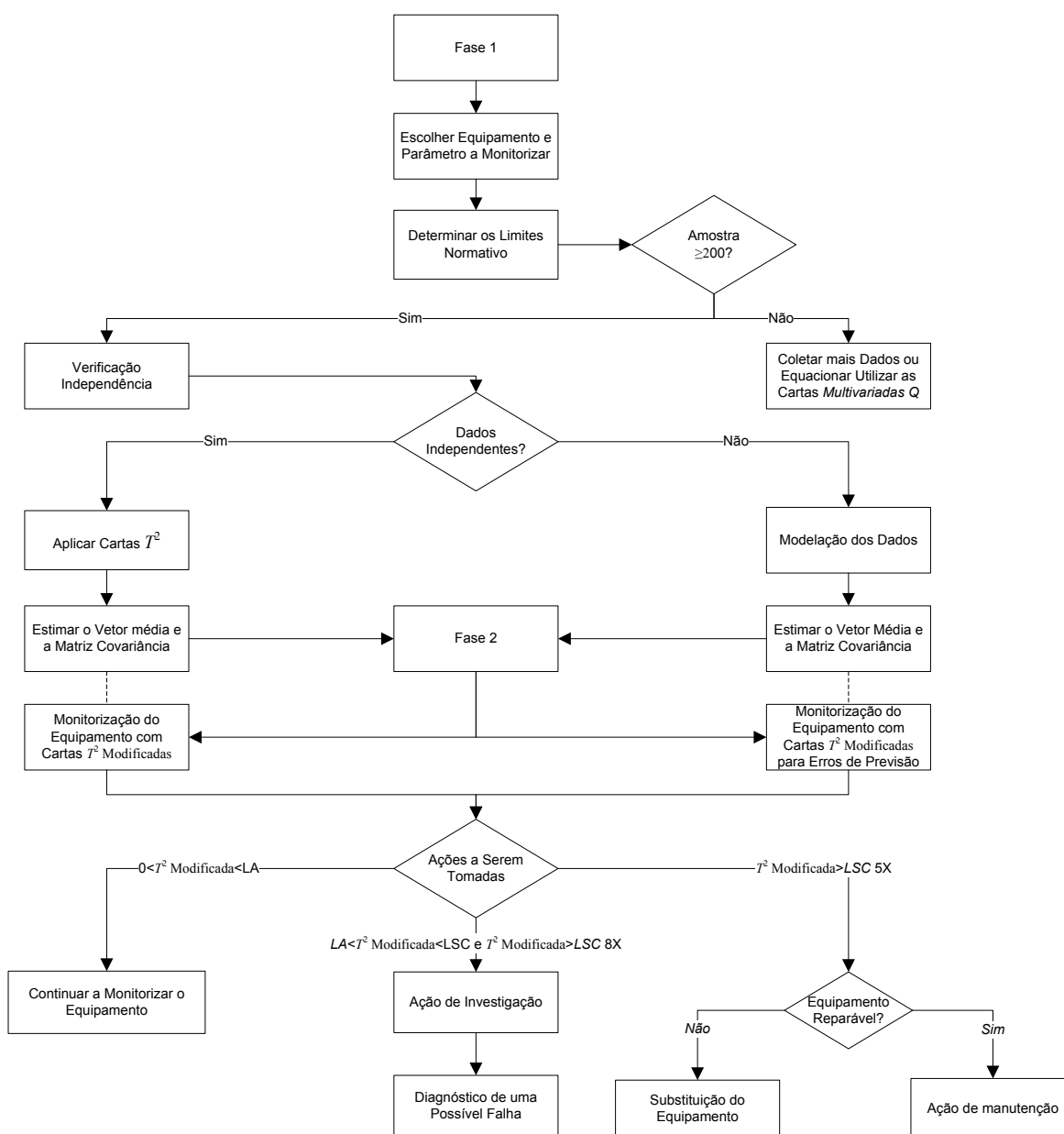


Figura 3.12 Metodologia de aplicação da carta de controle  $T^2M$

1. Recolher dados em diferentes pontos do equipamento quando o equipamento se encontra em boas condições de funcionamento.
2. Testar a independência das variáveis utilizando a *FACE* e a *FACPE*.
3. Aplicar a carta  $T^2$  com os dados recolhidos, se estes forem independentes, verificar a estabilidade de funcionamento do equipamento (por exemplo a normalidade dos dados), e estimar o vetor média e matriz covariância.
4. Desenvolver um modelo de *ARIMA* para os dados, se existir auto-correlação significativa.
5. Aplicar a carta de controlo  $T^2$  para os resíduos, para dados auto-correlacionados. Verificar a estabilidade e a normalidade dos dados. Estimar o vetor média e a matriz covariância dos resíduos.
6. Construir a carta  $T^2$  modificada para monitorizar os níveis dos parâmetros dos equipamentos utilizando a recolha de dados *online*.
  - Estimar dois limites de controlo para controlar a média do parâmetro a monitorizar, o *LSC* e o *LA*.
  - Definir baseado na norma ISO 2372:2003, o valor da vibração a partir do qual o sistema deve sofrer uma intervenção.
  - Estabelecer regras para atuação no sistema. Foram estabelecidas as seguintes:
    - Efetuar uma intervenção para detetar uma situação anómala quando forem detetados 8 pontos consecutivos acima do *LA*.
    - Proceder a uma manutenção de intervenção quando forem detetados 5 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.

### 3.4.3 Cartas de Controlo Especiais Multivariadas

A carta de controlo  $T^2$  é chamada carta de controlo de Shewhart porque a análise do processo é semelhante e é baseada no valor da estatística em determinado instante. Deve ser considerada a utilização de uma carta cumulativa multivariada dos dados, dado que se tornará mais sensível a qualquer alteração, pois utiliza dados anteriores ao atual.

As cartas multivariadas *MCUSUM* e *MEWMA* dependem, tal como as cartas univariadas *CUSUM* e *EWMA*, do valor de  $ARL_{EmControlo}$  e do desvio que pretendemos encontrar. Devido à existência de  $p$  variáveis, o desvio é medido por um parâmetro de não centralidade  $\delta^2(\mu)$  ou por  $\delta(\mu)$  chamado de “distância estatística” ou “distância de Mahalanobis”. O parâmetro de não centralidade  $\delta^2(\mu)$  é definido por:

$$\delta^2(\mu) = (\mu - \mu_0)' \Sigma^{-1} (\mu - \mu_0) \quad (3.87)$$

Onde  $\mu_0$  é o vetor média inicial do processo.

### 3.4.3.1 Carta de Controle CUSUM Multivariada Modificada - MCUSUMM

Consideram-se dois tipos de carta multivariada *MCUSUM* Modificada: uma para controlo do vetor média,  $\mu$ , e a outra para controlo da matriz covariância  $\Sigma$ . Na presente tese, apenas será desenvolvida a carta para controlo do vetor média.

#### Carta MCUSUMM para Controlo Vetor Média

A carta multivariada *MCUSUM* (*MCUSUMM*) representa os valores da estatística,  $Y^*$ , num dado instante,  $t$ , sendo definida por (Villalobos, 2005):

$$Y_t^* = \left( C_t' \Sigma^{-1} C_t \right)^{1/2} \quad (3.88)$$

Onde

$$C_t = 0 \text{ se } C_t^* \leq k$$

Para dados independentes:

$$C_t = (C_{t-1} + X_t - T_L) \left( 1 - \frac{k}{C_t^*} \right) \text{ se } C_t^* > k \quad (3.89)$$

$$C_t^* = \left( (C_{t-1} + X_t - T_L)' \Sigma^{-1} (C_{t-1} + X_t - T_L) \right)^{1/2} \quad (3.90)$$

E para dados auto-correlacionados (Lampreia *et al*, 2013a):

$$C_t = (C_{t-1} + e_t - T_L) \left( 1 - \frac{k}{C_t^*} \right) \text{ se } C_t^* > k \quad (3.91)$$

$$C_t^* = \left( (C_{t-1} + e_t - T_L)' \Sigma^{-1} (C_{t-1} + e_t - T_L) \right)^{1/2} \quad (3.92)$$

Com

$$C_0 = 0 \text{ e } k > 0$$

As cartas multivariadas *MCUSUM* dependem, tal como as cartas univariadas *CUSUM*, do valor de  $ARL_{EmControlo}$ , e do desvio que pretendemos detetar.

Quando  $Y_t^* > h$ , onde  $h$  é o limite de controlo, estamos perante uma situação fora de controlo. Considerando a construção da melhor carta e mais sensível, em que o valor de  $ARL_{ForadeControlo}$  é minimizado, Croisier (1988) propõe para a carta de controlo especial multivariada *CUSUM* os valores constantes na tabela seguinte:

Tabela 3.9 *h* da carta *MCUSUM* para  $k = 0,5$ 

$ARL_{EmControlo}$	$p$	$h$
200	2	5,50
	5	9,46
	10	14,9
500	2	6,65
	5	10,9
	10	17,2

Existem vários autores (Arkat *et al*, 2007) (Issam *et al*, 2008)) que simulam outros valores de *ARL* e restantes variáveis, calculando diferentes limites de controlo. No entanto, após análise cuidada dos resultados, convencionou-se utilizar os limites de  $p=5$ , face a escassez de dados simulados para este número de variáveis e face a maior proximidade do  $p=4$ .

Na presente dissertação foram simulados os resultados para os vários valores de  $k$ , face aos resultados, recomenda-se  $k=0,25$ .

### 3.4.3.1.1 *MCUSUMM* - Metodologia

Ao definir a metodologia a ser aplicada, deve-se ter em conta o tamanho da amostra e o tipo de dados a tratar.

De seguida é testada a independência, e a carta  $T^2$  vai ser aplicada para definir os parâmetros de funcionamento do equipamento (vetor média e matriz covariância). Se os dados forem auto-correlacionados, os modelos *ARIMA* devem ser aplicados, e a carta  $T^2$  é executada para os resíduos, e novamente estimam-se os parâmetros do processo.

Depois na Fase 2 a carta *MCUSUMM* é utilizada para efetuar a monitorização do equipamento. A monitorização é efetuada desde o registo do primeiro valor e somente sob determinadas circunstâncias são tomadas ações. Para definir os limites e para a própria execução das cartas baseamos-nos nas normas internacionais e nos valores limites definidos pelo fabricante e requisitos do utilizador (Requeijo *et al*, 2012).

Para implementar a carta *MCUSUMM*, deve ser seguida a próxima sequência:

1. Na Fase 1, os dados devem ser recolhidos nos  $m$  pontos, que melhor representem o seu estado. No caso das observações individuais devem ser recolhidas pelo menos 200 amostras.
2. Testar a independência das variáveis utilizando a *FACE* e a *FACPE*.
3. Se os dados forem independentes, aplicar a carta  $T^2$  baseada nos dados recolhidos, verificar a estabilidade do processo, a normalidade dos dados, e estimar o vetor média e matriz covariância (Lampreia *et al*, 2012a).
4. Se existir auto-correlação, construir um modelo para variáveis auto-correlacionadas utilizando os modelos *ARIMA*. (Lampreia *et al*, 2012a).
5. Aplicar a carta  $T^2$  para os resíduos, verificar a estabilidade e a normalidade dos dados, estimar o vetor média e matriz covariância para os resíduos. (Lampreia *et al*, 2012a)
  - Aplicar a carta *MCUSUMM* aos dados a serem recolhidos de forma a monitorizar o equipamento.

- Estimar os dois limites de controlo de forma a controlar a média do parâmetro a monitorizar, especificamente, o limite superior de controlo e o limite de alerta.
- Com base em normativo estabelecer o valor a partir do qual o sistema deve sofrer uma intervenção.
- Estabelecer as regras para atuar no equipamento. Sugerem-se as seguintes as seguintes:
  - Executar uma intervenção de investigação de forma a detetar uma eventual situação anómala, quando 8 pontos consecutivos estiverem acima do limite de alerta.
  - Proceder a uma intervenção de manutenção corretiva se o equipamento for reparável, ou substituir o equipamento se este for não reparável, se se observarem 5 pontos consecutivos estiverem acima do *LSC*.
- Antes de proceder à operação de investigação/manutenção analisar o espectro de frequências de forma a diagnosticar o tipo de avaria.

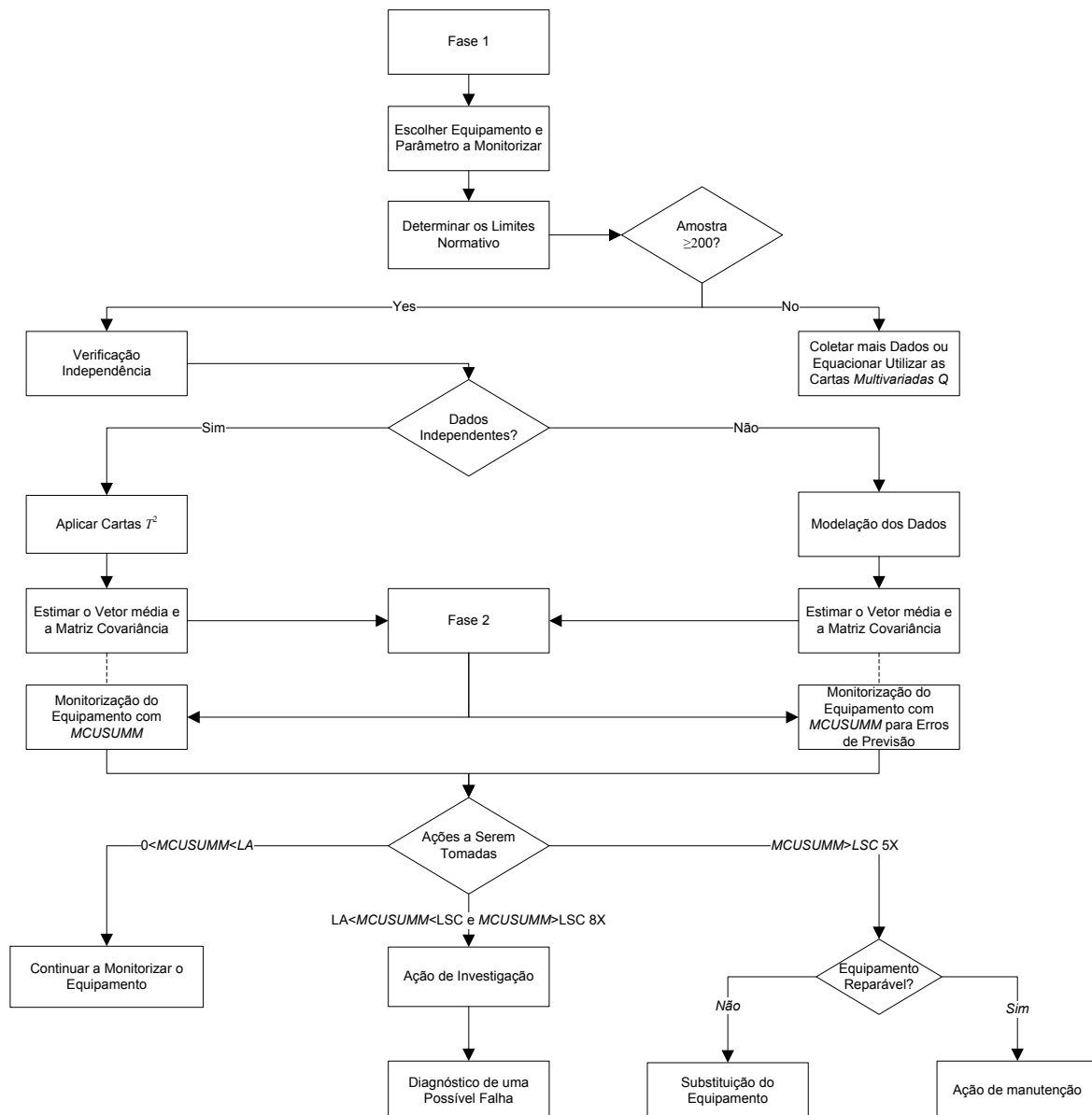


Figura 3.13 Metodologia de aplicação da carta de controlo *MCUSUM*

### 3.4.3.2 Cartas de Controlo Multivariadas EWMA - MEWMAM

Recentemente Zou & Tsung (2011) apresentaram uma proposta de alteração à carta *MEWMA*, a carta *MSEWMA*, que recorre também à forma quadrática, mas em vez de estimar o vetor média ( $\bar{X}$ ) e a matriz de covariâncias ( $S$ ), estima a mediana multivariada  $\theta_0$  e a matriz transformação, o que envolve interação entre os dados multivariados  $A_0$  (Zou & Tsung, 2011). Dado o tipo de dados em análise nesta dissertação, e os ganhos de sensibilidade que se obtém com as cartas *MSEWMA* (Zou & Tsung, 2011), optou-se também por efetuar uma alteração à carta *MEWMA*, mas com uma abordagem diferente, em que os princípios são semelhantes aos aplicados às cartas anteriores.

As cartas de controlo multivariadas *EWMA*, *MEWMA*, são construídas com base na estatística  $T^2$ , definida no instante  $i$  por:

$$T_i^2 = Z_i' \sum_Z^{-1} Z_i \quad (3.93)$$

Em que

$$Z_i = RX_i + (I - R)Z_{i-1}, \quad Z_0 = 0 \quad (3.94)$$

$$\sum_Z = \frac{\lambda}{2 - \lambda} (1 - (1 - \lambda)^{2i}) \Sigma \quad (3.95)$$

Na equação anterior,  $I$  é a matriz identidade,  $R = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p)$ , onde  $\lambda_j$  é a constante de amortecimento da variável  $j$  ( $j=1, 2, \dots, p$ ). Usualmente  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_p = \lambda$ , quando esta situação se verifica,  $Z_i$  é definido pela equação seguinte (Perry & Pignatiello, 2011) (Zhang & Chang, 2008):

$$Z_i = \lambda X_i + (1 - \lambda) Z_{i-1} \quad (3.96)$$

Com dados auto-correlacionados, as próximas fórmulas para utilização das cartas *MEWMA* serão utilizadas, sendo considerados os erros de previsão:

$$Z_i = \lambda(e_i - T_L) + (1 - \lambda) Z_{i-1} \quad (3.97)$$

$$\Sigma^{-1} (\lambda(e_i - T_L) + (1 - \lambda) Z_{i-1}) \quad (3.98)$$

Uma situação fora do controlo é detetada quando  $T_i^2 > H$ , onde  $H$  é o limite de controlo.

Os valores de  $H$  para  $ARL_{In Control} = 200$  e para diferentes valores de  $\delta(\mu)$  são indicados em (Montgomery, 2012) quando  $p = 2, 4, 6, 10, 15(0, 5; 1, 0; 1, 5; 2, 0; 3, 0)$  e  $\lambda(0, 05; 0, 10; 0, 20; 0, 30; 0, 40; 0, 50; 0, 60; 0, 80)$ .

Para obter a melhor carta *MEWMA*, o mesmo autor sugere que os melhores valores  $\lambda$  e  $H$  para  $p = 4, 10, 20$  são para  $ARL_{In Control} = 500$ ,  $ARL_{In Control} = 1000$ , para diferentes valores de  $\delta(\mu)(0, 5; 1, 0; 2, 0; 3, 0)$ . Relativamente ao valor de  $\lambda$  a adotar, a literatura sugere várias

possibilidades obtidas por simulação. Por exemplo para  $p=3$ , tem-se um valor  $\lambda=0,05$ , conforme refere Faraz *et al* (2011) considerando o enquadramento da *General Motors*.

Tal como nas cartas univariadas *EWMA*, a carta *MEWMA* multivariada mostra uma sensibilidade elevada, quando comparando com a carta  $T^2$  e  $\chi^2$  para *shifts* pequenos e moderados (Pereira & Requeijo, 2012) (Lampreia, 2013b).

### 3.4.3.2.1 MEWMAM - Metodologia

Para a aplicação da carta *MEWMAM* também se tem em conta a dimensão da amostra. Deve ser seguida a seguinte sequência:

1. Na Fase 1 estuda-se a independência dos dados, comparando a *FACE* e a *FACPE* com as respetivas funções teóricas, *FAC* e *FACP*, respetivamente.

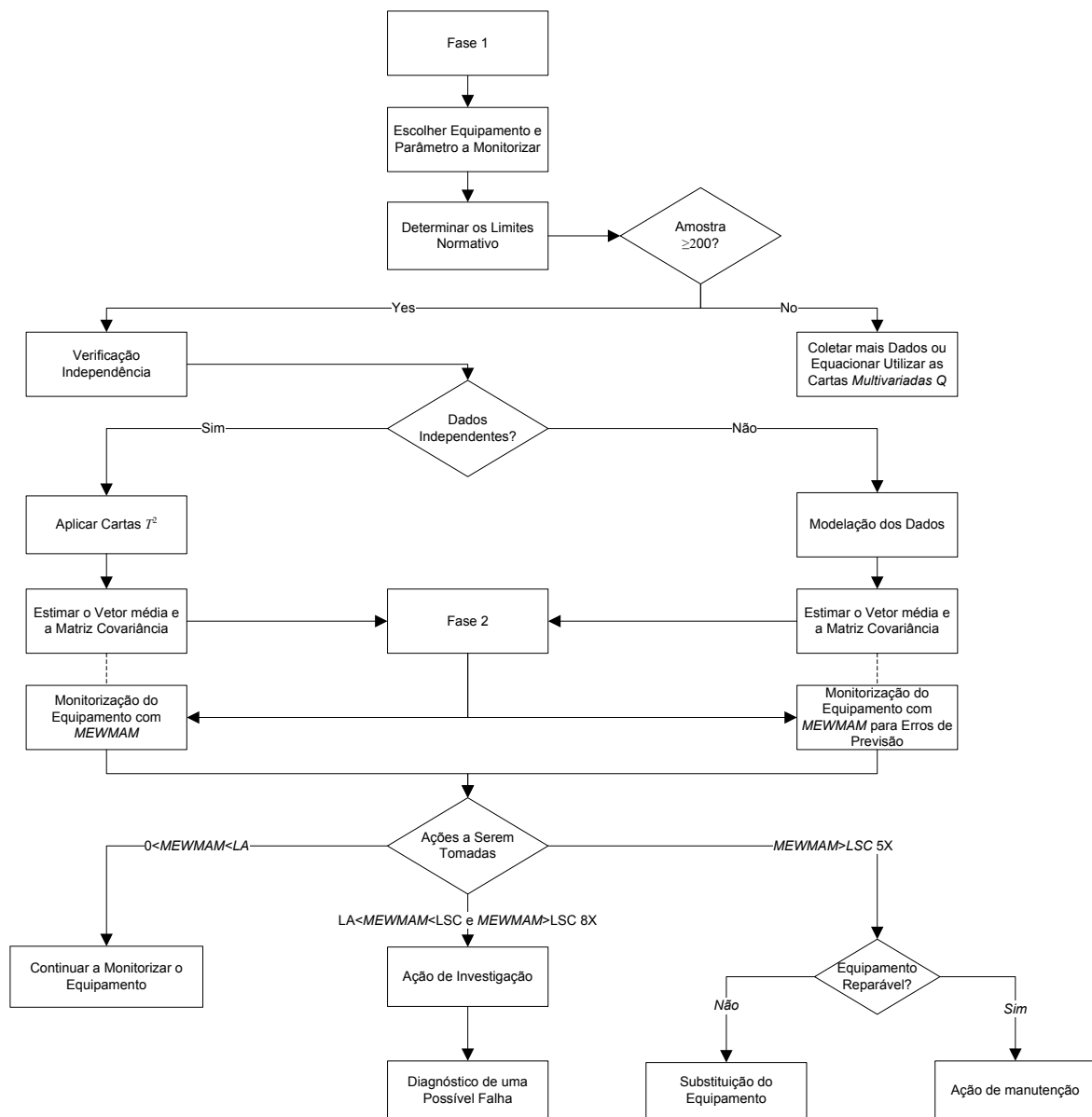


Figura 3.14 Metodologia de aplicação da carta de controlo *MEWMAM*

2. Se os dados forem auto-correlacionados, os modelos ARIMA são aplicados, e a carta T2 é construída, se, não utilizam-se os dados originais. Se a distribuição é Normal e estável o vetor média e a matriz covariância são calculados. Nesta fase são recolhidas no mínimo 200 amostras de observações individuais.
3. Na Fase 2 a carta *MEWMAM* é utilizada para monitorização do equipamento desde a primeira recolha de dados. Para isso são definidas regras de deteção baseadas em normativo, e deve ser considerado a seguinte sequência:
  - Estimar os limites para controlar a média do parâmetro a monitorizar, o *LSC* e o *LA*.
  - Regras para atuação no sistema:
    - Executar uma intervenção quando forem detetados 8 pontos consecutivos acima do *LA*.
    - Proceder a uma intervenção de manutenção quando forem detetados 5 pontos consecutivos acima do *LSC*.
  - Antes de proceder à operação de investigação/manutenção analisar o espetro de frequências de forma a diagnosticar o tipo de avaria.

### 3.5 Cartas de Controlo Short Run Modificadas

As cartas de controlo *short run* são cartas de controlo para pequenas produções. Quando a aplicação das cartas para pequenas produções é a solução mais viável deve-se ter em consideração as seguintes ações (Pereira & Requeijo, 2012):

- a. Inspeccionar o primeiro e último produto, que o torna um processo de alto risco em haver produtos não conformes.
- b. A inspeção de 100% dos produtos aumenta os custos de produção.
- c. A aplicação destas cartas de controlo aos produtos tem as seguintes desvantagens:
  - Alguns produtos têm demasiada informação para ser analisada.
  - Impossibilidade de construir cartas de controlo para um produto que não é continuamente produzido e que tem pequenos lotes de produção.
  - Com a falta de dados, a capacidade de deteção das causas especiais diminui, e as devidas ações corretivas não são tomadas.

Se referirmos o conceito de suficiência, podemos considerar estimar a probabilidade,  $p$ , com seis em  $n$  leituras de um parâmetro de funcionamento de uma máquina. Não é necessário conhecer todos os  $n$  dados para caraterizar uma população, e mediante a aplicação de determinadas técnicas é possível aplicar cartas de controlo para uma população pequena (Fonseca, 2001).

#### 3.5.1 Condição de Aplicação das Cartas de Controlo ShortRun

Pereira & Requeijo (2012) sugerem a aplicação das seguintes cartas de controlo:

Tabela 3.10 Cartas de controlo *short run*

	Cartas
Dados suficientes para estimar parâmetros do processo	Carta das Diferenças – cartas $D$
	Cartas $Z$ e $W$
Dados insuficientes para estimar parâmetros do processo	Cartas $Q$
	Cartas $CUSUMQ$ e $EWMAQ$

As cartas *short run* que foram consideradas na presente investigação, devido às suas características e aplicabilidade, são as cartas  $Q$ ,  $CUSUMQ$  e  $EWMAQ$ .

### 3.5.2 Cartas de Controlo $Q$

Em alguns processos não é possível estimar os parâmetros de forma fidedigna, pelo que a aplicação das cartas  $Z$  e  $W$  não é a indicada. Por outro lado, existindo insuficiência de informação, a aplicação das cartas *Shewhart* também não é viável. Nestes casos a metodologia de *Charles Quesenberry* é aplicada, onde a característica  $X$  (que é uma variável contínua) é transformada em  $Q$ .

Tendo  $Q$  uma distribuição  $N(0, 1)$  com distribuição normal reduzida, ou seja tem uma média de zero e uma variância unitária. A variável  $X$  é independente e identicamente distribuída de acordo com uma distribuição normal reduzida  $N(\mu, \sigma^2)$ . Esta metodologia transforma as estatísticas determinadas no instante  $i$  com a estimativa dos parâmetros em  $(i-1)$ , considerando todos os dados antes desse instante.

Devido às características dos dados recolhidos nesta investigação somente as cartas de controlo  $Q$  de observações individuais e para as amplitudes móveis serão consideradas. Os princípios das cartas *Shewhart* e das cartas  $Z$  e  $W$  são aplicados nas cartas  $Q$ . As cartas  $Z$ ,  $W$  e  $Q$  podem ser chamadas de cartas  $d$  e *Shewhart* modificadas, visto os princípios serem os mesmos para todas elas.

#### 3.5.2.1 Cartas de Controlo $QM$

Face à escassez de dados, não se pode controlar a média da variável de  $X$ , por isso transformamos  $X$  na variável  $Q$ . A característica  $Q$  no instante  $r$  é:

$$Q_r(X_r) = \Phi^{-1} \left( G_{r-2} \left( \sqrt{\frac{r-1}{r}} \left( \frac{X_r - (T_L)_{r-1}}{S_{r-1}} \right) \right) \right), \quad r = 4, 5, \dots \quad (3.99)$$

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* 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, somente os valores de  $Q$  superiores ou iguais a zero são considerados, para uma variável com limite mínimo só os valores inferiores ou iguais a zero serão considerados (Quesenberry, 1996).

A média e a variância no instante  $r$  é:

$$\bar{X}_r = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r X_j \quad (3.100)$$

$$S_r^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (X_j - \bar{X}_r)^2 \quad (3.101)$$

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.
- $G_v(\bullet)$  - Distribuição de T-student em função de  $v$  graus de liberdade.

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

$$LSC_Q = 3 \quad (3.102)$$

$$LC_Q = 0 \quad (3.103)$$

$$LIC_Q = -3 \quad (3.104)$$

A análise da carta  $Q_x$  difere da análise da carta  $Q(X)$ , uma vez que as regras definidas em ISO8258:1991 não são aplicadas no presente estudo. A análise da carta é descrita em 3.5.2.1.1 e aplicada no Capítulo 5.

### 3.5.2.1.1 QM – Metodologia

A metodologia proposta para aplicação da carta  $QM$  na monitorização de parâmetros de funcionamento de equipamentos reparáveis é conforme se segue:

1. Recolher dados de funcionamento do equipamento dos pontos definidos para monitorizar.

2. Construir a carta  $QM$  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 normativo respetivo.
  - 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.

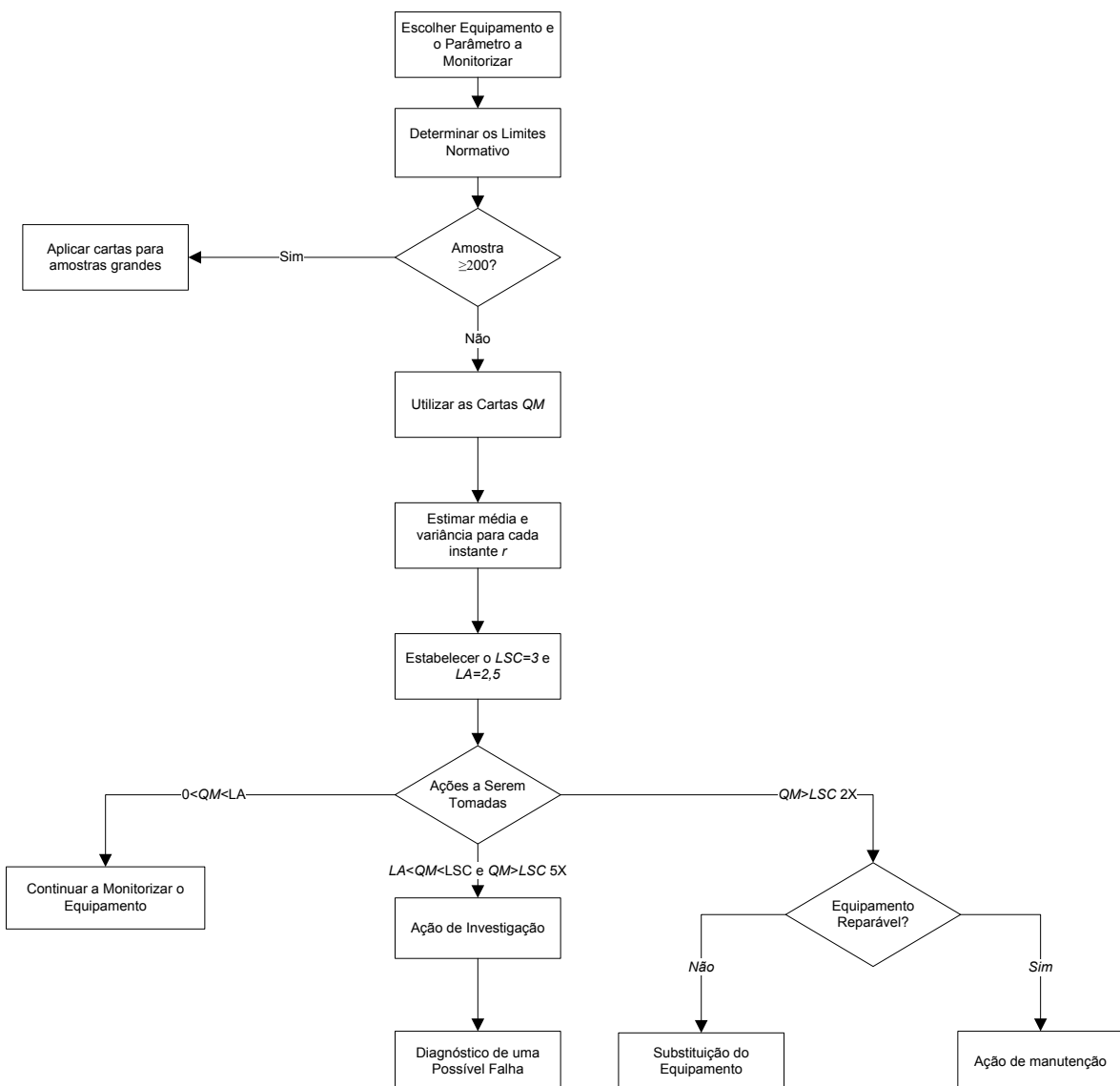


Figura 3.15 Metodologia de aplicação da carta de controlo  $QM$

### 3.5.2.2 Cartas Short Run Especiais Modificadas

As cartas especiais para pequenas amostras, carta  $CUSUMQ$  e a carta  $EWMAQ$  são uma boa alternativa à carta  $Q$  quando os *shifts* são pequenos e moderados.

#### 3.5.2.2.1 Carta $CUSUMQ$ Modificada

Uma vez que possuímos poucos dados para estudar, para além da carta  $Q(X)$  Modificada, 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 3.99.

Para as cartas  $CUSUMQM$ , com as estatísticas  $T$  e  $C$ , consultar Lampreia & Requeijo (2012c) e Lampreia *et al* (2012d).

$$T_t = \min(0, T_{t-1} + (Q_t + k)) \quad (3.105)$$

$$C_t = \max(0, C_{t-1} + (Q_t - k)) \quad (3.106)$$

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).

#### 3.5.2.2.1.1 $CUSUMQM$ - Metodologia

A metodologia proposta para aplicação da carta  $CUSUMQM$  na monitorização de parâmetros de funcionamento de equipamentos reparáveis é conforme se segue:

1. Recolher dados de funcionamento do equipamento dos pontos definidos para monitorizar.
2. Construir a carta  $CUSUMQM$  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 é efetuada da seguinte forma:
  - O  $LSC$  e o  $LA$  são definidos de acordo com os ábacos de Gan (1991).
  - Os níveis admissíveis dos parâmetros são definidos pelo normativo respetivo.
  - As regras para atuar no equipamento utilizando as cartas  $CUSUMQM$  são:
    - ♦ Efetuar uma ação de investigação se existirem 5 pontos consecutivos entre o  $LA$  e o  $LSC$ .
    - ♦ 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.

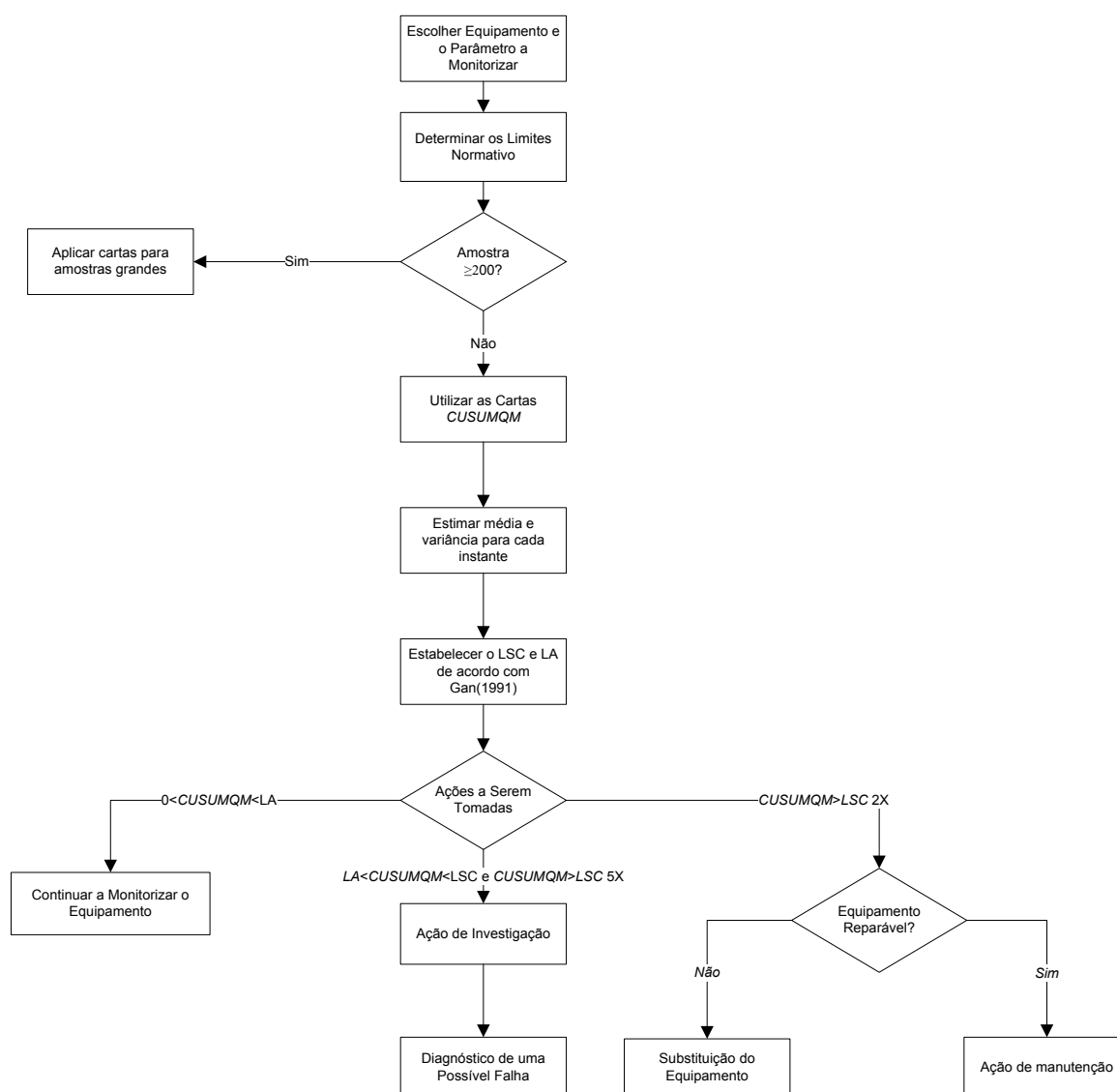


Figura 3.16 Metodologia de aplicação da carta de controle *CUSUMQM*

### 3.5.2.2.2 Carta *EWMAQ* Modificada

As estatísticas  $Q$  para a carta *EWMAQ* Modificada (*EWMAQM*) são determinadas da mesma forma que nas cartas  $Q$  (Equação 3.99). Para a carta *EWMAQM*, a variável exponencialmente amortecida,  $E$ , é dada por (Lampreia *et al*, 2012d):

$$E_t = \max \left( 0, (1 - \lambda) E_{t-1} + \lambda (\bar{Q}_t - T_L) \right), \quad 0 < \lambda < 1 \quad (3.107)$$

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  $\delta_1$  uma constante.

Os limites de aviso e superior de controlo para esta carta são dados pelas equações (3.108) e (3.109).

$$LA_E = K_1 \sigma_E \quad (3.108)$$

$$LSC_E = K_2 \sigma_E \quad (3.109)$$

Em que

$$\sigma_E = \sigma_{\bar{X}} \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}} \quad (3.110)$$

A variável  $Q$  segue uma distribuição Normal reduzida ( $\mu_Q = 0$ ,  $\sigma_{Q^2} = 0$  e  $E_0 = \mu_Q = 0$ ). Onde  $\lambda$  é a constante de amortecimento e  $K$  é o limite de controlo. Para definir  $\lambda$  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 (Snoussi, 2005). No entanto à medida que os dados se acumulam, outras cartas são mais aconselháveis e podem vir a substituir as primeiras.

#### 3.5.2.2.2.1 EWMAQM - Metodologia

A metodologia proposta para aplicação da carta *EWMAQM* na monitorização de parâmetros de funcionamento para equipamentos reparáveis é a seguinte:

1. Recolher dados de funcionamento do equipamento dos pontos pré-definidos para monitorizar.
2. Construir a carta *EWMAQM* 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 é efetuada da seguinte forma:
  - O *LSC* e o *LA* são definidos de acordo com os ábacos de Crowder (1989).
  - Os níveis admissíveis dos parâmetros são definidos pelo normativo respetivo.
  - As regras para atuar no equipamento utilizando a carta *EWMAQM* são:
    - Efetuar uma ação de investigação se existirem 5 pontos consecutivos entre o *LA* e o *LSC*.
    - Proceder a uma ação de manutenção se existirem 2 pontos consecutivos acima do *LSC*.
  - Antes de proceder à operação de investigação/manutenção analisar o espetro de frequências de forma a diagnosticar o tipo de avaria.



Figura 3.17 Metodologia de aplicação da carta de controlo *EWMAQM*

### 3.5.3 Cartas de Controlo *MQ*

Se se estiver perante um processo em que existem múltiplas características com desvios padrão diferente, pequenas amostras e poucas oportunidades de efetuar medidas num equipamento podemos efetuar o controlo estatístico multivariado com pequenas amostras, obtendo ainda um controlo fidedigno (Wise *et al*, 1998).

Em síntese: quando não existem dados suficientes para um controlo estatístico de Shewhart, deve-se equacionar a utilização das cartas *Q*. Para esta estatística considera-se a distribuição de  $p$  características, que obedecem a uma distribuição Normal multivariada  $N_p(\mu, \Sigma)$ .

Nesta investigação para as cartas *MQx* apenas se abordará as observações individuais, pois são o tipo de dados que foram recolhidos dos equipamentos.

A análise da carta  $MQ_X$  Modificada ( $MQM$ ) é idêntica à da carta  $Q_X$ . Tal como na carta  $Q_X$  um dos problemas desta carta é a baixa sensibilidade na deteção de causas especiais de variação. Então as regras 1 a 6 da norma ISO8258:1991, cujo para a primeira, basta apenas uma existência fora do limite de controlo para haver motivo de alerta, e na sexta, quatro ou cinco pontos fora das zonas B e A, do mesmo lado da linha central ( $LC$ ) aplicam-se neste tipo de carta (Pereira & Requeijo, 2012).

Assim, considerando observações individuais, para cada característica da qualidade, o  $p$  o vetor  $X$  é transformado na estatística  $Q$ , definida por:

$$Q_r(X_r) = \max\left(0; \Phi^{-1}\left(F_{p,r-l-p}(A_r)\right)\right), \quad r = p+2, p+3, \dots \quad (3.111)$$

$$A_r = \left(\frac{(r-1)(r-1-p)}{rp(r-2)}\right) M_r^2 \quad (3.112)$$

Dada a forma quadrática da expressão anterior, é indiferente, no caso da aplicação da carta  $MQM$ , usar o máximo ou mínimo: todos os resultados conduzem aos limites superiores. (Lampreia *et al*, 2012c)

$$M_r^2 = (\max(X_r - (T_L)_{r-1}))' S_{r-1}^{-1} (\max(X_r - (T_L)_{r-1})) \quad (3.113)$$

Onde

$$X_r = (X_{r1}, X_{r2}, \dots, X_{rp})' \quad (3.114)$$

$$(T_L)_r = (T_L)_N - 3\sigma_{r-l} \quad (3.115)$$

$$S_r = \left(\frac{r-2}{r-1}\right) S_{r-1} + \frac{1}{r} (X_r - \bar{X}_{r-1})' (X_r - \bar{X}_{r-1}) \quad (3.116)$$

Quando o processo está sob controlo, e  $X$  segue uma Distribuição Normal Multivariada, os valores de  $Q$  são independentes e distribuídos de acordo com a Norma reduzida ( $N(0;1)$ ). Então o limite central e o limite superior é definido por:

$$LSC_{MQ} = 3 \quad (3.117)$$

$$LC_{MQ} = 0 \quad (3.118)$$

A análise da carta  $MQ_X$  é descrita na metodologia e é adaptada ao equipamento sob estudo, de acordo com normativo aplicável e com o fabricante.

### 3.5.3.1 MQM - Metodologia

A metodologia proposta para aplicação da carta *MQM* na monitorização de parâmetros de funcionamento de equipamentos reparáveis é a seguinte:

1. Recolher dados de funcionamento do equipamento dos pontos definidos para monitorizar, considerar mais do que um ponto.

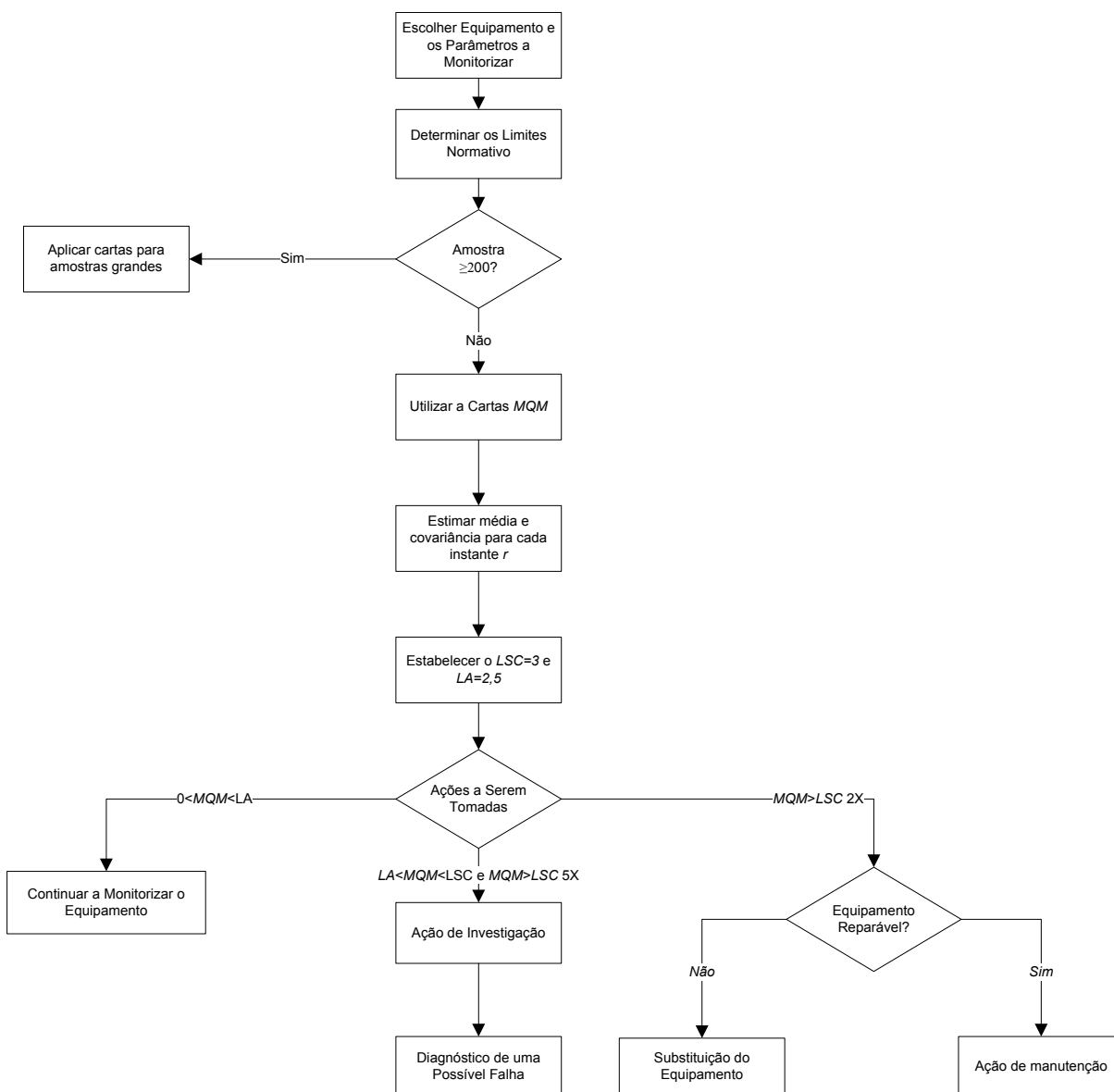


Figura 3.18 Metodologia de aplicação da carta de controlo *MQM*

2. Construir a carta *MQM* baseada nos dados recolhidos considerando que os dados são independentes.
3. Estimar a média, e a covariância dos parâmetros de funcionamento do equipamento para cada instante.

4. A monitorização dos parâmetros de funcionamento do equipamento é efetuada da seguinte forma:
- O  $LSC$  e o  $LA$  são definidos como sendo 3 e 2.5, respetivamente.
  - Os níveis admissíveis dos parâmetros são definidos pelo normativo respetivo.
  - As regras para atuar no equipamento utilizando as cartas  $MQM$  são:
    - ♦ Efetuar uma ação de investigação se existirem 5 pontos consecutivos acima do  $LA$ .
    - ♦ 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.

### 3.5.4 Cartas de Controlo Multivariadas Especiais para Short Run

A variável  $Q(X)$  é definida pela equação (3.100), e estas são consideradas independentes e distribuídas através da Normal  $N(0,1)$ . Então é possível aplicar a estas variáveis os conceitos cumulativo e média amortecida.

#### 3.5.4.1 Carta $MCUSUMQ$ Modificada

A carta  $MCUSUMQ$  Modificada ( $MCUSUMQM$ ) é de somas cumulativas e é construída baseando-se nas estatísticas  $Q(X)$  ou  $Q(\bar{X})$  descritas em (3.5.2.1). Isto é nas equações (3.89) e (3.90) substitui-se  $(X_t - T_L)$  por  $(Q_t - k)$ . Outras definições constantes em (3.5.2.2.1) aplicam-se à carta  $MCUSUMQM$  (Pereira & Requeijo, 2012).

$$C_t = C_{t-1} + (Q_t - k) \quad C_0 = 0 \quad C_t^* \leq k \quad k > 0 \quad (3.119)$$

$$\Sigma^{-1} (C_{t-1} + (Q_t - k)) \quad (3.120)$$

$$C_t = (C_{t-1} + Q_t - k) \left( 1 - \frac{k}{C_t^*} \right) \quad (3.121)$$

$$C_t^* = \left( (C_{t-1} + Q_t - k) \Sigma^{-1} (C_{t-1} + Q_t - k) \right)^{1/2} \quad (3.122)$$

$$Y_t^* = \left( C_t^* \Sigma^{-1} C_t \right)^{1/2} \quad (3.123)$$

#### 3.5.4.1.1 $MCUSUMQM$ – Metodologia

A metodologia proposta para a aplicação das cartas  $MCUSUMQM$  é a seguinte:

1. Recolher dados de funcionamento do equipamento em  $m$  pontos pré-definidos para monitorizar, em mais do que um ponto.
2. Construir a carta  $MCUSUMQM$  baseada nos dados recolhidos considerando que os dados são independentes.

3. Estimar a média, e a covariância dos parâmetros de funcionamento do equipamento para cada instante.
4. A monitorização dos parâmetros de funcionamento do equipamento é efetuada da seguinte forma:
  - O *LSC* e o *LA* são definidos conforme 3.5.2.2.1.
  - Os níveis admissíveis dos parâmetros são definidos pelo normativo respetivo.
  - As regras para atuar no equipamento utilizando as cartas *MCUSUMQM* são:
    - ♦ Efetuar uma ação de investigação se existirem 5 pontos consecutivos acima do *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.

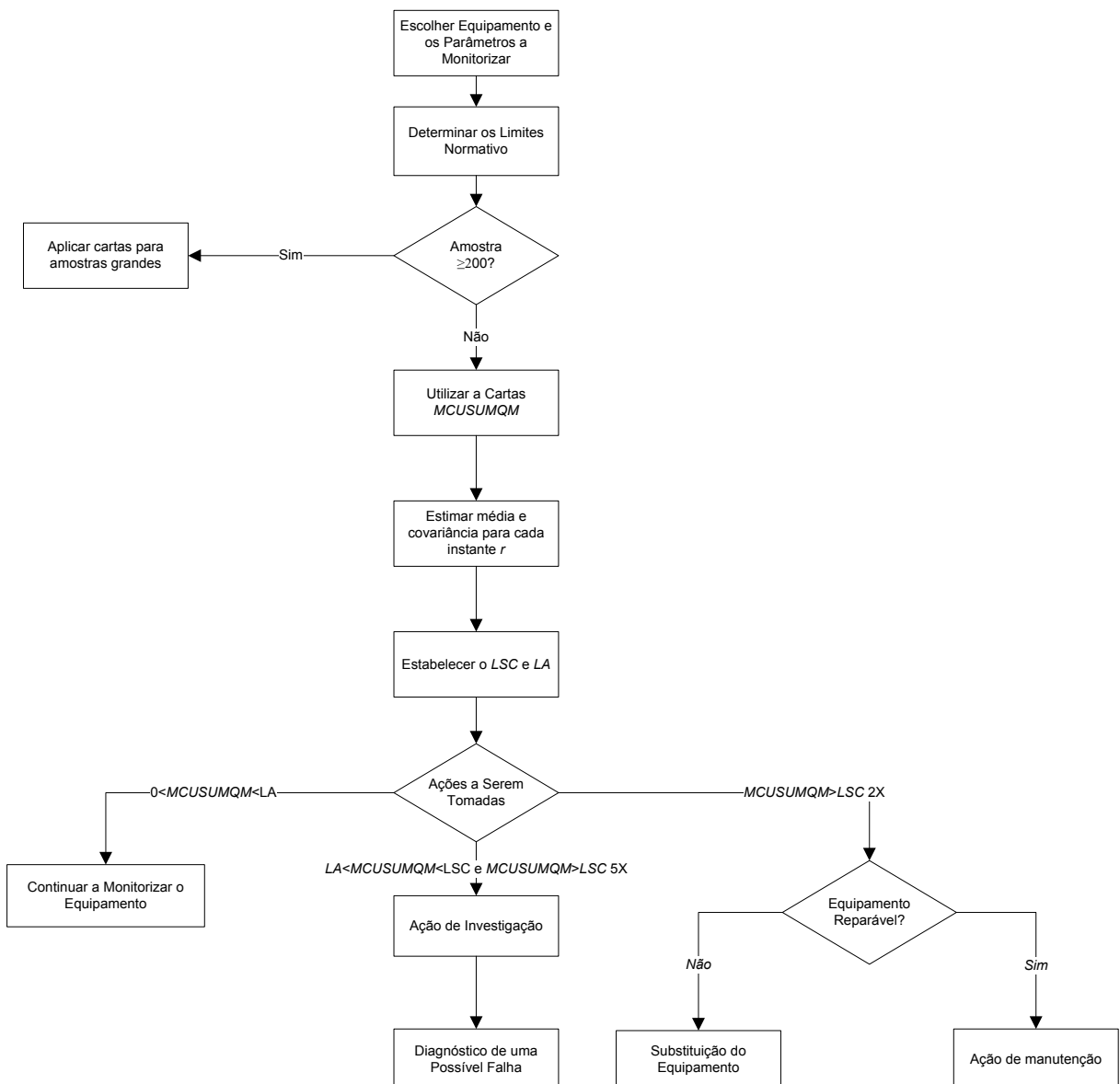


Figura 3.19 Metodologia de aplicação da carta de controlo *MCUSUMQM*

### 3.5.4.2 Carta MEWMAQ Modificada

A carta *MEWMAQ* Modificada (*MEWMAQM*), tal como a carta *MCUSUMQ*, é construída com base na estatística em  $Q(X)$  aplicando os desenvolvimentos de 3.5.2.2.2, substituindo a equação  $Q_t$  por  $Q(X)_t$ . Os limites de controlo da carta *MEWMAQM* podem ser dados pela Equação (3.108) e (3.109) todas as outras considerações efetuadas para a carta *EWMAQM* são válidas para a carta *MEWMAQ* (Pereira & Requeijo, 2012).

$$Z_t = (1 - \lambda)Z_{t-1} + \lambda.Q_t, \quad Z_{t-1} = 0 \quad (3.124)$$

$$\Sigma^{-1}(1 - \lambda)Z_{t-1} + \lambda.Q_t \quad (3.125)$$

$$T_i^2 = Z_i \sum_Z^{-1} Z_i \quad (3.126)$$

#### 3.5.4.1.1 Carta MEWMAQM – Metodologia

A metodologia proposta para a aplicação das cartas *MEWMAQM* é a seguinte:

1. Recolher dados de funcionamento do equipamento dos  $m$  pontos pré-definidos para monitorizar, em mais do que um ponto.
2. Construir a carta *MEWMAQM* baseada nos dados recolhidos considerando que os dados são independentes.
3. Estimar a média, e a covariância 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* e o *LA* são definidos conforme 3.5.2.2.2.
  - Os níveis admissíveis dos parâmetros são definidos pelo normativo respetivo.
  - As regras para atuar no equipamento utilizando as cartas *MEWMAQM* são:
    - Efetuar uma ação de investigação se existirem 5 pontos consecutivos acima do *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.

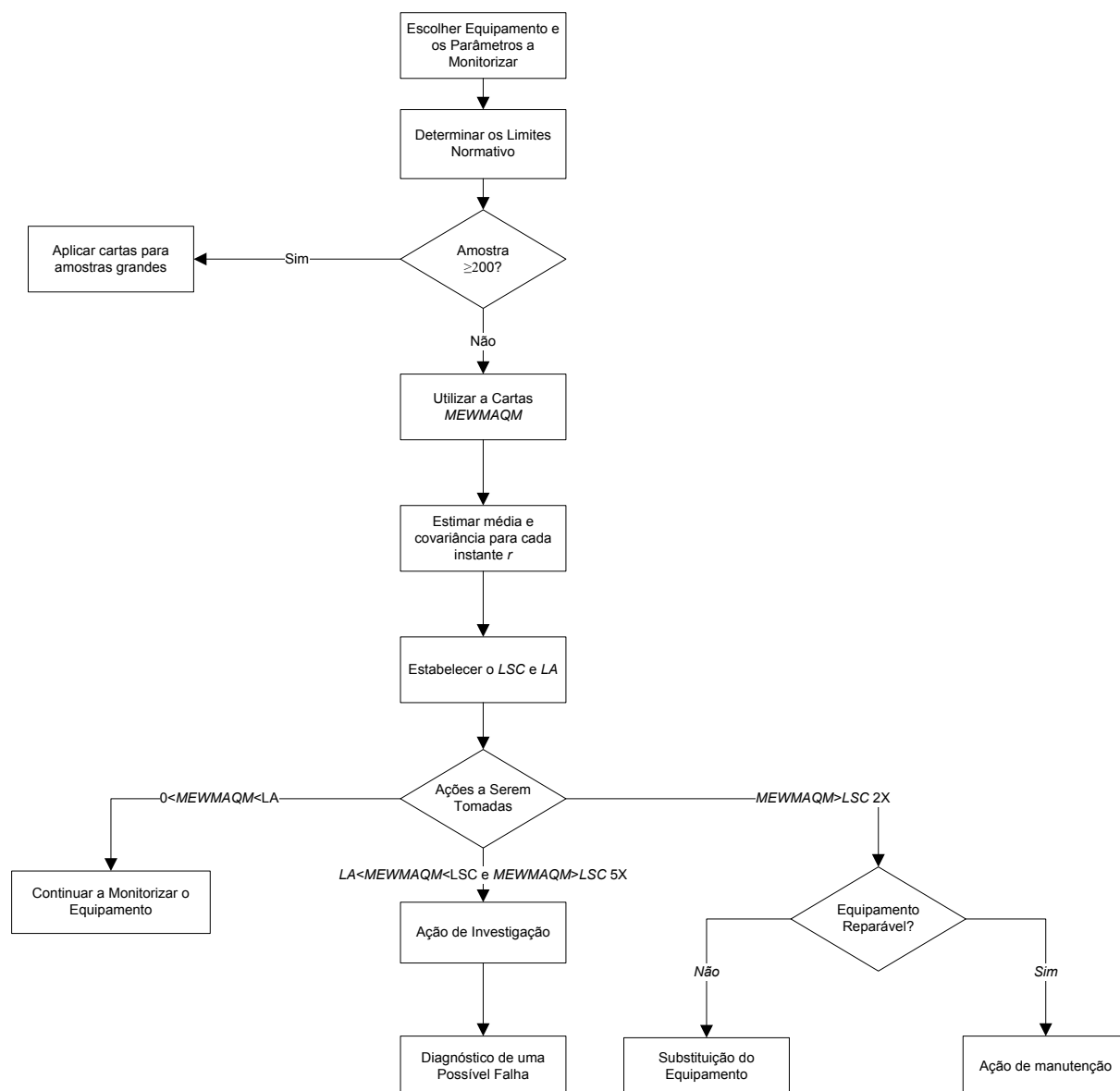


Figura 3.20 Metodologia de aplicação da carta de controlo *MEWMAQM*

### 3.6 Considerações

O controlo estatístico do processo é uma metodologia importante no controlo de qualidade de produtos. Neste capítulo apresentaram-se alterações às cartas que vão permitir a sua aplicação na monitorização de equipamentos.

Com as metodologias apresentadas é possível aplicar as cartas de controlo modificadas em amostras grandes, amostras pequenas, a dados independentes e a dados auto-correlacionados.

Para amostras grandes consideraram-se duas fases, a Fase 1 e a Fase 2. Na Fase 1, para o estudo univariado foram utilizadas as cartas tradicionais de forma a definir os parâmetros de funcionamento normal dos equipamentos. Quando os dados forem independentes, utilizam-se as observações registadas diretamente e, se auto-correlacionados aplicam-se os modelos *ARIMA*. Na

Fase 1 para o estudo multivariado, são também utilizadas cartas multivariadas tradicionais, com os mesmos condicionalismos para a independência dos dados.

Na segunda fase, no estudo univariado podem ser utilizados dois tipos de cartas as *CUSUMM* e as *EWMAM*, ambas demonstram sensibilidade elevada, são utilizadas as observações diretamente se os dados forem independentes, e são utilizados os erros de previsão relativos ao modelo ajustado se os dados forem auto-correlacionados. Na Fase 2, para dados multivariados podem ser utilizadas as cartas  $T^2M$ , as *MCUSUMM* e as *MEWMAM*, e existe o condicionalismo habitual relativo à independência tal como para o estudo univariado.

Para pequenas amostras vai existir somente uma fase, consideram-se os dados independentes e normais, e a monitorização é efetuada desde a quarta observação, são apresentados vários tipos de cartas a aplicar: *QM*, *CUSUMQM*, *EWMAQM*, *MQM*, *MCUSUMQM* e *MEWMAQM*.

A aplicabilidade das cartas de controlo modificadas ao controlo de condição *online* será demonstrada nos capítulos 4 e 5.

---

## **CAPÍTULO 4 - IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA NUM PROTÓTIPO**

---

*“Deste modo todos os demais  
movimentos, isto é os movimentos  
perturbadores, são evitados pelas  
forças interiores dos mesmos corpos”  
(Escola Naval, 1904)*



## CAPÍTULO 4

### *4.1 Enquadramento da Implementação da Metodologia*

### *4.2 Equipamentos em Laboratório*

### *4.3 Aplicação de Cartas de Controlo Univariadas*

### *4.4 Aplicação de Cartas de Controlo Multivariadas*

### *4.5 Diagnóstico*

### *4.6 Considerações*

### **4.1 Enquadramento da Implementação da Metodologia**

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais da aplicação da metodologia definida nos capítulos anteriores a um protótipo - uma eletrobomba, utilizada para concretizar a parte experimental.

No caso desta eletrobomba, inicialmente considerou-se a possibilidade de registar valores de vibrações e temperaturas, realizando assim estudos multivariados. Contudo, cedo se verificou que as temperaturas nos pontos considerados para realizar as observações não tinham variabilidade - donde a decisão de realizar apenas estudos usando os dados das vibrações.

### **4.2 Equipamentos em Laboratório**

#### **4.2.1 Características do Equipamento de Medição de Vibrações**

O equipamento de medição e recolha de vibrações utilizado é um modelo CSI 2130 da Emerson, Figura 4.1, cujas características podem ser consultadas com mais detalhe em (Emerson, 2013). Os dados foram recolhidos após elaboração de uma rota de aquisição no *software* instalado num PC portátil específico e que depois foi transferida para o aparelho. Recolhidos os dados, estes foram exportados em formato de texto para o PC. A partir desta transferência podem ser utilizados vários tipos de configuração no armazenamento de dados e ser selecionadas várias técnicas para o tratamento estatístico dos mesmos. Os dados para tratamento foram recolhidos e tratados em RMS e também em frequência com registo de 1598 linhas.



Figura 4.1 Equipamento de recolha de dados: CSI 2130 da Emerson

No que diz respeito ao transdutor, foi utilizado o acelerómetro A0760GP, Figura 4.2, e foi fixado na eletrobomba através de uma base magnética.



Figura 4.2 Sensor - Acelerómetro usado na recolha de dados: A0760GP

Atendendo ao tipo de sensor utilizado e à forma desejável para tratamento dos dados, o CSI foi configurado para recolher dados em Ace-Vel (aceleração-velocidade).

#### 4.2.2 Eletrobomba

O protótipo utilizado é constituído por uma eletrobomba de água apresentada na Figura 4.3, e sobre a qual foi possível introduzir, de modo controlado e sujeito às necessidades da experimentação, níveis de degradação controlados pelo investigador: desapertos, desalinhamentos de vários níveis pré-especificados.

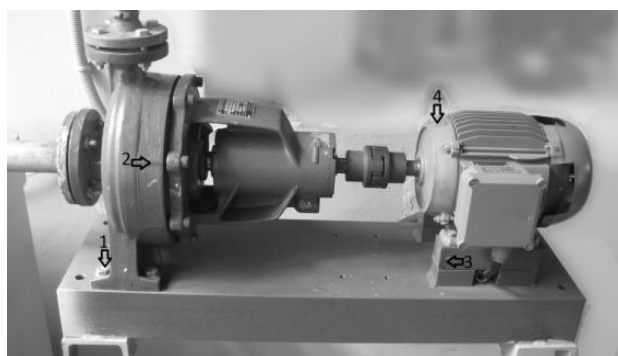


Figura 4.3 Eletrobomba de água e pontos de análise de vibração

É de referir que o protótipo utilizado nesta dissertação é uma eletrobomba de circulação de água potável de um navio já alienado da Organização.

As características da eletrobomba encontram-se na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 Características da eletrobomba

Caraterísticas do Motor Elétrico	Caraterísticas da Bomba
AEG Type AM90LX4QY IEC 60034 3~Mot N°48020481t Th.cl.f IP55 50Hz:Δ/Y 220/380V, 1.5kw 60Hz: Δ/Y250/440V, 1.2kw 1400/1680min-1cosφ0.80/0.80 50Hz:220-240/380-420V, 6.6/3.8A 60Hz:250-277/440-480V, 6.4/3.7A	BB Allweiler AG. Germany Type: NT2/25-200 Diâmetro (Ø)190 U3.1D W3 N°K.03577/001 Year 200

Esta máquina foi selecionada para o início do estudo porque veio permitir estudar os dados de vibração com eficiência, sendo possível a introdução artificial de anomalias, bem como o agravamento das mesmas. Foram para isso recolhidos dados em RMS e em espectros de forma a poder relacionar os dados recolhidos com um possível diagnóstico. Com a medição de vibrações, pretendeu-se detetar a intensidade de vibração a partir do qual o equipamento poderia apresentar anomalias.

Ainda que tenham sido forçadas várias anomalias e testados os respetivos efeitos sobre o nível de vibração, neste capítulo apresentam-se apenas os resultados correspondentes a situações forçadas de desaperto progressivo do lado do motor elétrico, com 4 níveis de agravamento seguintes: 30N/m<sup>2</sup>, 25N/m<sup>2</sup>, 20N/m<sup>2</sup>, 10N/m<sup>2</sup> e 0N/m<sup>2</sup>.

Para lá do fator nível de desaperto, antes mencionado, consideraram-se ainda como fatores que interferiram com as medições, a carga a que a bomba estava sujeita e o operador que efetuou a recolha dos dados. Os dados, tal como em Parreira (2010), foram recolhidos à pressão constante de 1.8 kg/cm<sup>2</sup>. Para minimizar eventuais interferências, a água circulava em circuito fechado com aspiração e descarga para o mesmo tanque, limitando os efeitos da variação de pressão na bomba.



Figura 4.4 Medição de vibração num ponto do protótipo

É de referir que na presente investigação, como se minimizou os fatores de ruído, para efeitos de cálculo, estes não foram considerados. Procurou-se cumprir com um padrão de Repetibilidade e Reprodutibilidade. A nível da repetibilidade, verificou-se uma considerável variância, causada por fatores introduzidos pela própria variável “vibração”. No que respeita a reprodutibilidade, existiram

dados recolhidos por dois operadores, que de uma forma geral não interferiram nesse mesmo parâmetro, Figura 4.4.

As definições de Repetibilidade e Reprodutibilidade encontram-se no Glossário.

Os pontos de medição na Eletrobomba – pontos 1, 2, 3 e 4 - são os representados na Figura 4.3. Na escolha dos pontos a observar teve-se em conta as considerações seguintes:

- Identificar e caracterizar o estado de vibração da máquina, considerado normal ou de referência para as futuras medidas.
- Relacionar o estado do equipamento com os parâmetros a analisar.
- Desenvolver e estabelecer uma metodologia que permita caracterizar o equipamento e detetar as alterações significativas relativamente ao estado de referência bem como a correlação entre os parâmetros medidos.
- Estruturar um sistema de recolha de dados que permita a monitorização da vibração e, eventualmente, de outras variáveis passíveis de serem medidas nos mesmos pontos.

A metodologia de tratamento dos dados está de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 3 para amostras grandes.

#### 4.2.3 Os Limites de Vibração Considerados

Em funcionamento, os equipamentos estão sujeitos a uma determinada vibração que é natural ou normal. Quando se utiliza a análise de vibrações na monitorização da condição dos equipamentos, pretende-se identificar o momento em que a vibração medida deixa de ser a “normal” e passa a ter valores excessivos.

Existem várias normas que definem os limites de intensidade de vibração de uma máquina, em que são comparados os valores medidos com os valores normalizados.

A norma ISO 2372:2003 é uma das normas utilizadas na regulação da intensidade vibratória, abrangendo as medições do nível global da vibração em máquinas que operam entre os 600 e 12000 rpm (rotações por minuto).

Face às características da eletrobomba sob investigação, a Norma ISO 2372 é a aplicável sendo os limites definidos de acordo com o anexo III. A Norma indica que 1,12 *mm/s RMS* é o valor limite tolerável de vibração para motores da classe I (potência inferior a 15KW/20HP)

Nesta investigação e na metodologia desenvolvida considerou-se para limite de vibração da eletrobomba as recomendações da norma referida. Com base na experiência com dados recolhidos (Mota, 2009) e com base nas cartas controlo originais, poderia ter-se definido os limites em relação à média em vez de usar o  $T_L$  referido no capítulo 3. Face ao risco de falsos alarmes e correspondentes custos de manutenção, foi decidido monitorizar o equipamento usando as cartas modificadas.

A razão pela qual os dados recolhidos foram expressos em unidades de velocidade (mm/s) e não em unidades de aceleração ou de deslocamento prende-se com o fato de que, para a eletrobomba, a funcionar a 1600 rpm, a medição de vibração em velocidade tem uma boa resposta para todas as gamas de frequência não sendo a aceleração uma boa unidade medida para baixas frequências nem o deslocamento uma boa unidade para as altas frequências. (Institute, 2005)

### 4.3 Aplicação de Cartas de Controlo Univariadas

#### 4.3.1 Fase 1

Para a Fase 1 foram recolhidas 241 amostras nos 4 pontos escolhidos para representar o estado da eletrobomba e através destes dados foram estimados os parâmetros do processo.

Os dados de vibração para as cartas univariadas foram recolhidos no ponto 2. As representações dos dados para as outras 3 variáveis encontram-se em Anexo IV. Aos pontos 1, 2, 3 e 4 (ponto 1, ponto 2, ponto 3 e ponto 4) vamos chamar variáveis 1, 2, 3 e 4 respetivamente (Var1, Var2, Var3 e Var4).

Para os dados inicialmente recolhidos, em que ainda não se substituíram eventuais valores acima ou abaixo dos limites da carta de controlo considerada, ou seja resultados sem revisão, obteve-se as seguintes *FACE* e *FACPE* das Figuras 4.5 e 4.6.

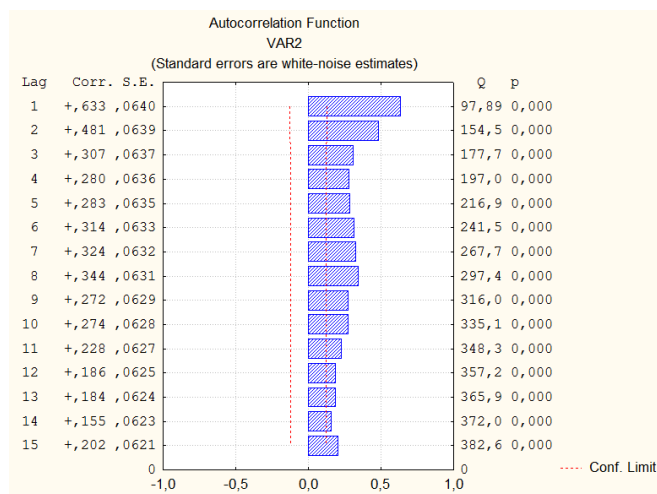


Figura 4.5 *FACE* dos dados não revistos - Var2

A *FACE*, Figura 4.5, sugere que existe auto-correlação dos dados, pois apresenta uma correlação positiva e um decréscimo exponencial.

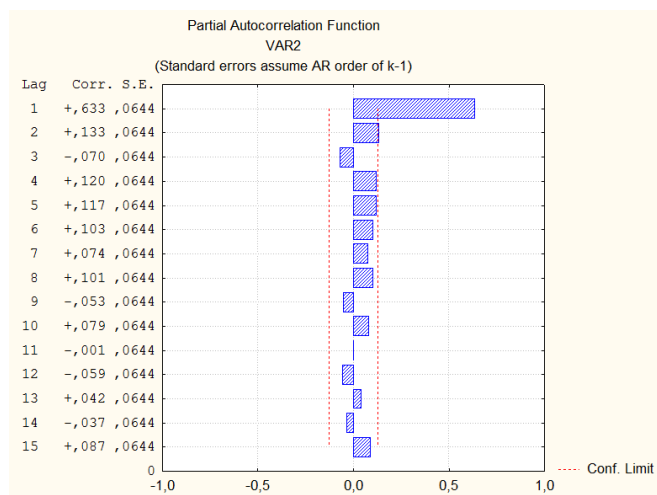


Figura 4.6 *FACPE* dos dados não revistos - Var2

A *FACPE* dos dados não revistos, Figura 4.6, apresenta um pico para um determinado *lag*, significando estarmos sob um modelo *ARI*.

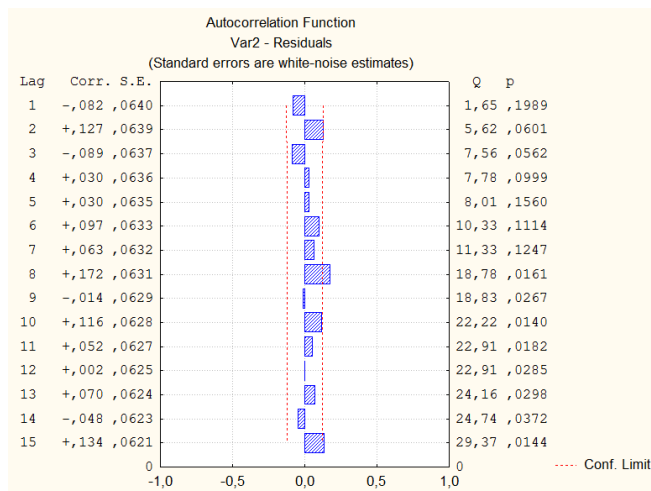


Figura 4.7 *FACE* dos resíduos não revistos - Var2

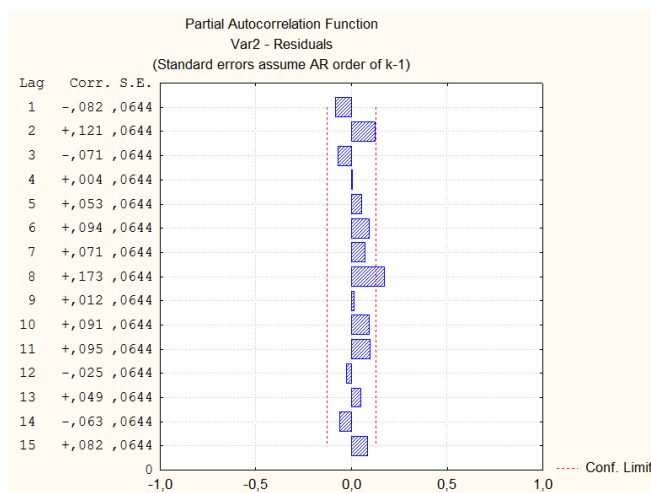


Figura 4.8 *FACPE* dos resíduos não revistos - Var2

Observando a *FACE* dos resíduos verifica-se agora a independência na transformação dos dados, pois não existe decréscimo progressivo nem picos significativos para além dos limites estabelecidos, Figura 4.7.

Para a *FACPE*, Figura 4.8, verifica-se a par da *FACE*, que não existem *Lag*'s significativos confirmando a independência. Ou seja como é um *Lag* afastado pode ser desprezado.

Os parâmetros do equipamento sem os dados revistos encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Parâmetros para o equipamento com os dados não revistos – Var2

$\mu$	$\phi_1$	$\phi_2$	$d_2$	$\xi$
0,4823	0,6367	-	1,128	0,175

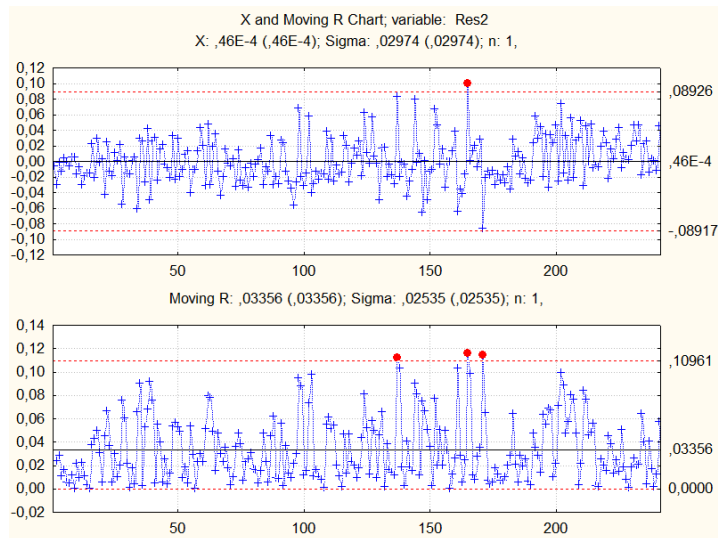


Figura 4.9 Carta de controlo e  $-MR$  dos resíduos com dados não revistos - Var2

Como foram verificadas observações acima do limite superior de controlo para a carta  $X$  e para carta  $MR$ , optou-se pela sua substituição pelo valor previsto, e procedeu-se à aplicação do modelo  $ARIMA$  novamente.

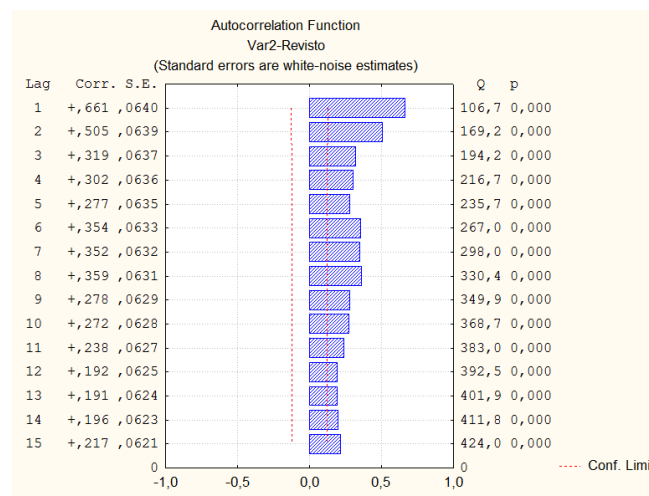


Figura 4.10 FACE dos dados - Var2

Na Figura 4.10, verifica-se novamente o decréscimo exponencial da função auto-correlação.

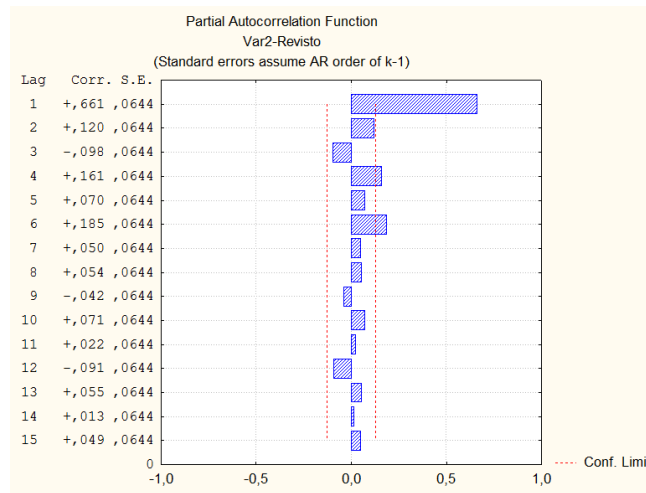


Figura 4.11 FACPE dos dados – Var2

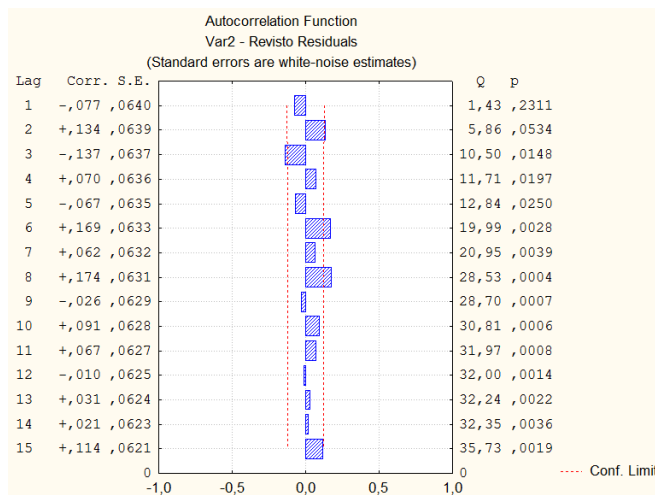


Figura 4.12 FACE dos resíduos – Var2

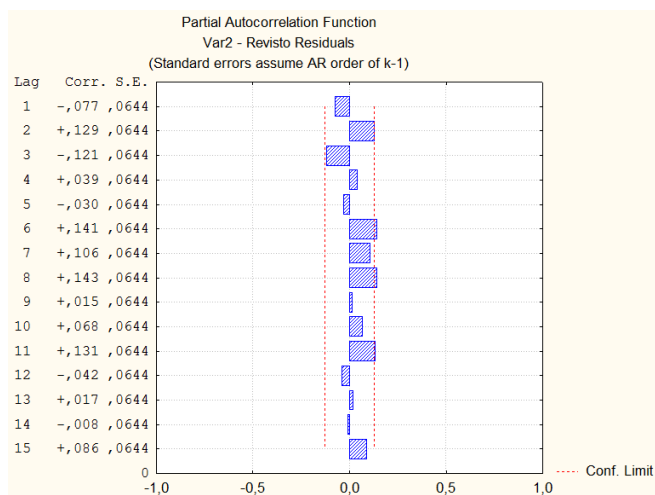


Figura 4.13 FACPE dos resíduos - Var2

Na Figura 4.11, a FACPE, revela um modelo *ARI*, desvalorizando os *lags* que saem fora dos limites definidos por terem valores baixos.

Para ambas *FACE* e *FACPE* aplicadas aos resíduos verifica-se a independência, pelo que procedemos ao cálculo dos parâmetros do processo.

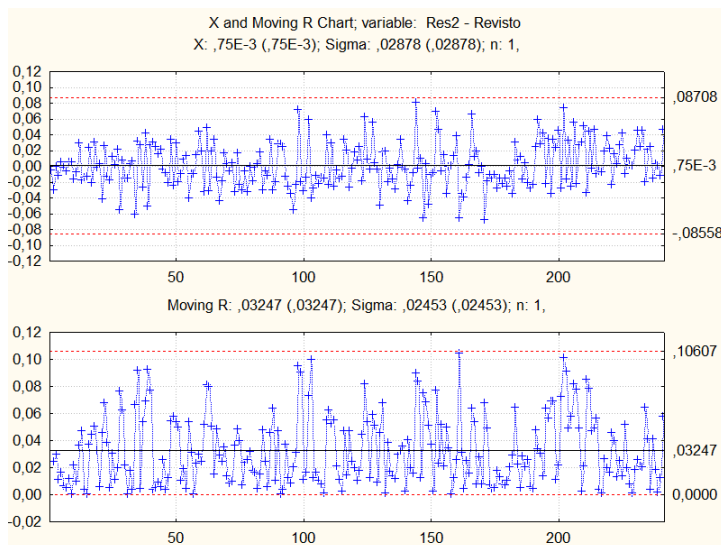


Figura 4.14 Carta de controlo  $\bar{x}$ -MR dos resíduos - Var2

Como se pode verificar na Figura 4.14, não existem observações nem acima do limite superior de controlo, nem abaixo do limite inferior de controlo, pelo que se pode efetuar o cálculo dos parâmetros.

Os parâmetros do modelo aplicado às vibrações medidas no equipamento para a Var2 encontram-se apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Parâmetros para a Var2

$\mu$	$\phi_1$	$\phi_2$	$d_2$	$\xi$
0,4815	0,6651	-	1,128	0,1613

De forma a testar a Normalidade de dados existem vários testes dos quais podemos utilizar o Teste do Gráfico de Probabilidades da Distribuição Normal (Montgomery *et al*, 1990) o Teste do Qui-Quadrado e Teste Kolmogorov-Smirnov (Guimarães & Cabral, 2010) que são testes de Qualidade de Ajuste, e o Teste W (Shapiro & Wilk, 1965) que se baseia numa Análise de Variância. Normalmente os testes são utilizados no *SPC* e pode-se utilizar o do Qui-Quadrado e o Kolmogorov-Smirnov (Requeijo, 2003). Nesta dissertação optou-se pelo último teste, o teste de Kolmogorov-Smirnov.

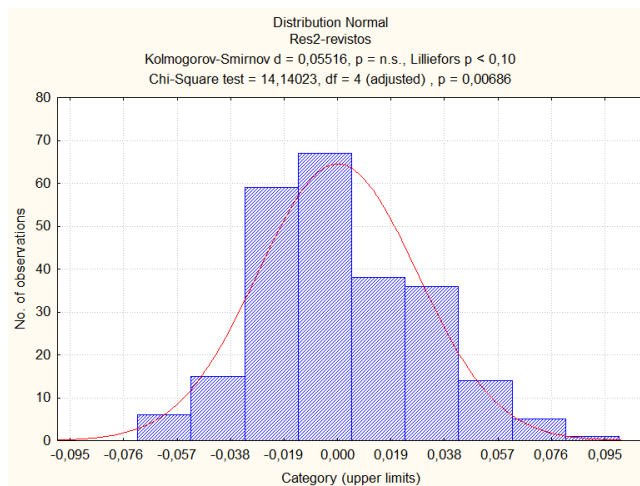


Figura 4.15 Verificação da normalidade dos resíduos revistos - Var2

Assim, a Normal foi verificada com o teste de Kolmogorov-Smirnov, Figura 4.15, em que  $D_{Crítico} = \frac{0,886}{\sqrt{N}} = \frac{0,886}{\sqrt{241}} = 0,0571$  para  $\alpha = 5\%$ , para o ponto 2 da eletrobomba:  $d = 0,05516$ . Uma vez que  $d < D_{Crítico}$  a condição de normalidade não é rejeitada.

Os parâmetros do modelo ARIMA para as quatro variáveis apresentam-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Parâmetros do modelo para as quatro variáveis

	Var1	Var2	Var3	Var4
Modelo	AR2	AR1	AR2	AR2
$\xi$	0,069	0,161	0,4757	0,2369
$\phi_1$	0,481	0,6651	0,1888	0,3055
$\phi_2$	0,348	-	0,1688	0,2409
$\rho_1$	0,736	0,0486	0,2420	0,4000
$\rho_2$	0,347	-	0,1660	0,2380

A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros estimados para as quatro variáveis:

Tabela 4.5 Parâmetros do equipamento estimados para as quatro variáveis

	Var1	Var2	Var3	Var4
Modelo	AR2	AR1	AR2	AR2
$\overline{MR}$	0,029	0,0327	0,09494	0,04393
$d_2$	1,128	1,128	1,128	1,128
$\sigma_\varepsilon$	0,026	0,0290	0,084	0,039
$\hat{\mu}$	0,405	0,4815	0,7408	0,5223
$\hat{\sigma}$	0,036	0,0295	0,087	0,043

### 4.3.2 Fase 2

#### Aplicação das cartas EWMA e CUSUM

Para a Fase 2 foram recolhidas 100 amostras sem perturbação (Agravamento 0), 100 com introdução de uma anomalia (Agravamento 1), 100 para o agravamento 2, 50 para o agravamento 3 e 50 para o agravamento 4. Também aqui os resultados apresentados correspondem à Var2; para as restantes variáveis os gráficos são apresentados no anexo IV.

Para estabelecer os limites baseamo-nos na ISO 2372. Assim, o valor limite de vibração considerado de  $(T_L)_N$  para o equipamento é  $(T_L)_N = 1,12$ .

Os valores considerados para definir os limites das cartas CUSUMM são:

Tabela 4.6 Limites carta CUSUMM e  $(T_L)_N$ 

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

Tabela 4.7  $T_L$  correspondente a  $(T_L)N$

$(T_L)N$		1,12
$T_L$	$0,5 \sigma$	0,61
	$1 \sigma$	0,61
	$1,5\sigma$	0,61

**Carta *CUSUMM***

Sem avarias introduzidas a carta *CUSUMM* não regista qualquer valor, Figura 4.16.

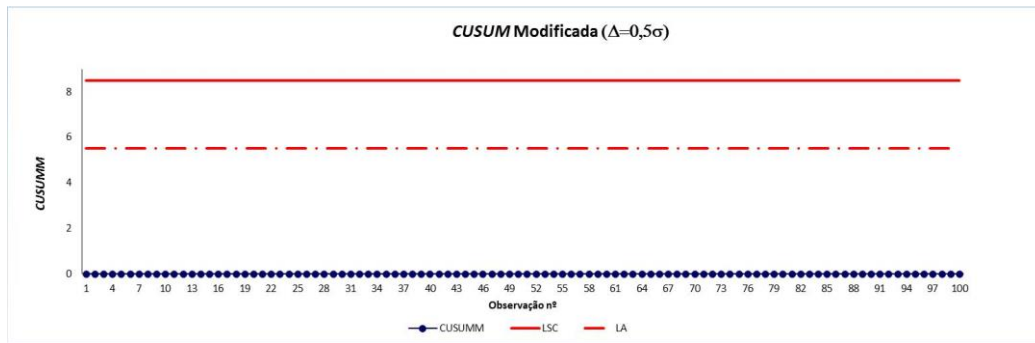


Figura 4.16 Carta *CUSUMM* – sem avaria  $\Delta=0,5\sigma$

Para o primeiro agravamento, registam-se algumas observações, contudo significativamente abaixo do *LSC* e *LA*, Figura 4.17.

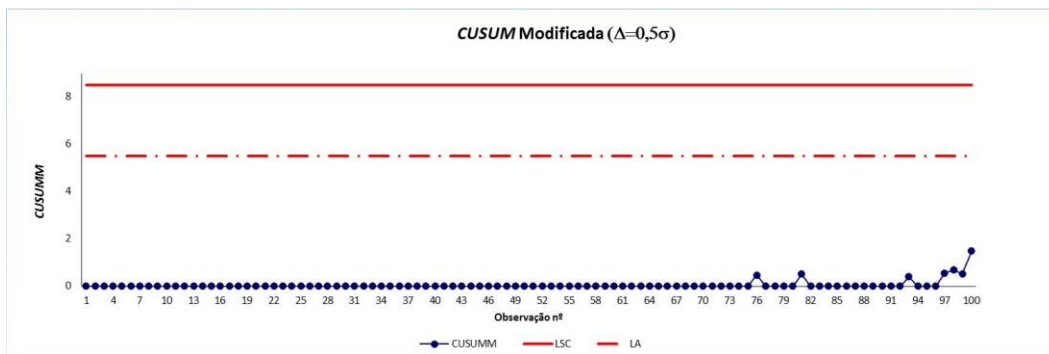


Figura 4.17 Carta *CUSUMM* – 1º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

Para o segundo agravamento, ainda todas as observações se encontram em baixo dos limites definidos, Figura 4.18.

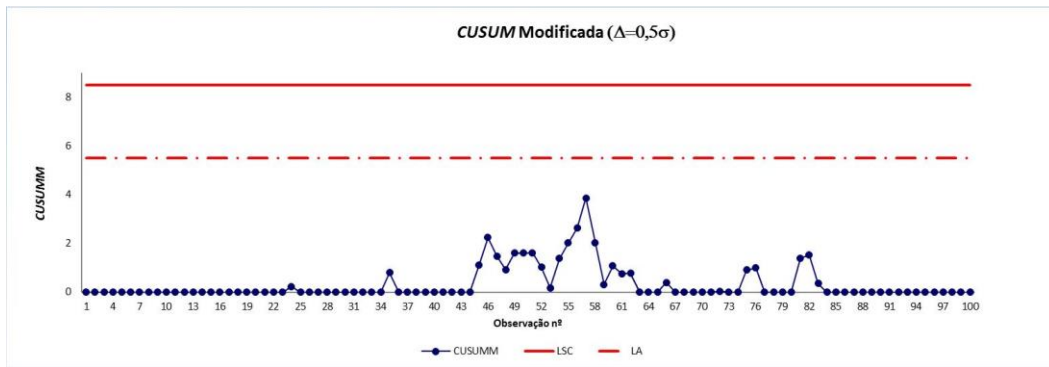


Figura 4.18 Carta *CUSUMM* – 2º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

No terceiro agravamento da avaria, na observação nº 30, de acordo com as regras definidas existe a necessidade de proceder a uma intervenção investigação; após esses valores verifica-se um decréscimo nos valores de vibração e não existe necessidade de intervenção, Figura 4.19.

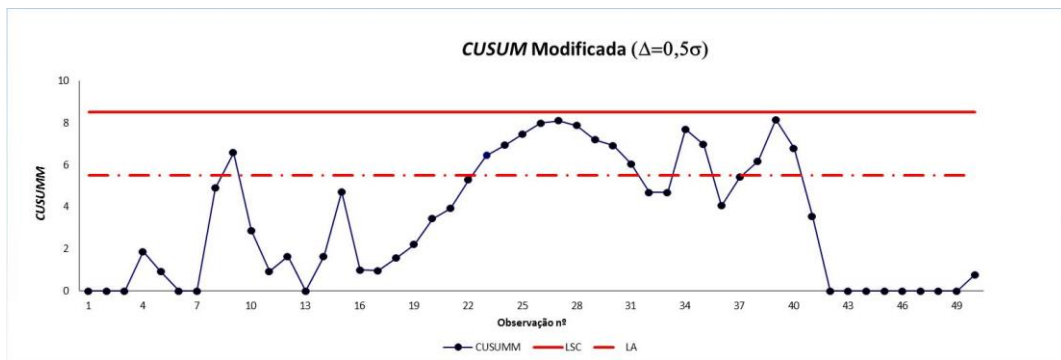


Figura 4.19 Carta *CUSUMM* – 3º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

Para o quarto agravamento, considerando  $\Delta=0,5\sigma$ , verifica-se que na observação nº 28 é necessário proceder a uma ação de investigação e a partir da observação 29 é necessário proceder a uma ação de intervenção, Figura 4.20.

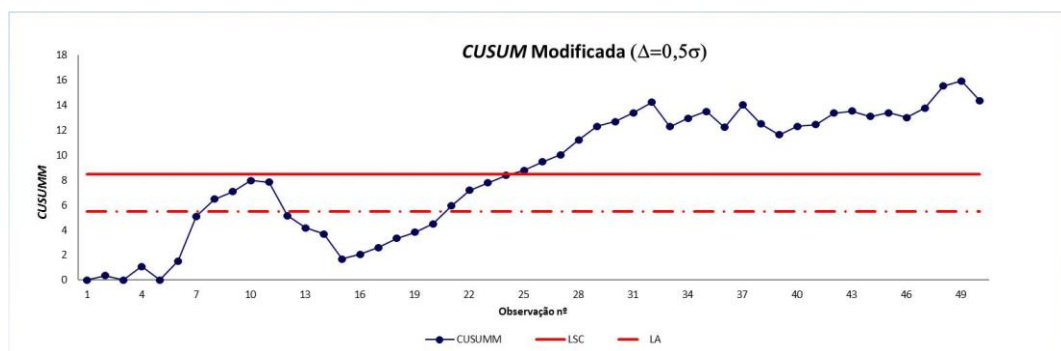


Figura 4.20 Carta *CUSUMM* – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

Com  $\Delta=1\sigma$  verificam-se algumas alterações no traçado da carta. Da observação 7 a 12 existem pontos acima do *LA*, mas não se verifica a necessidade de intervenção, após isso existe um decréscimo de valores de vibração. Só na observação 28 existe necessidade de intervenção de investigação e já na observação 29 dever-se-á proceder a uma ação de manutenção, Figura 4.21.

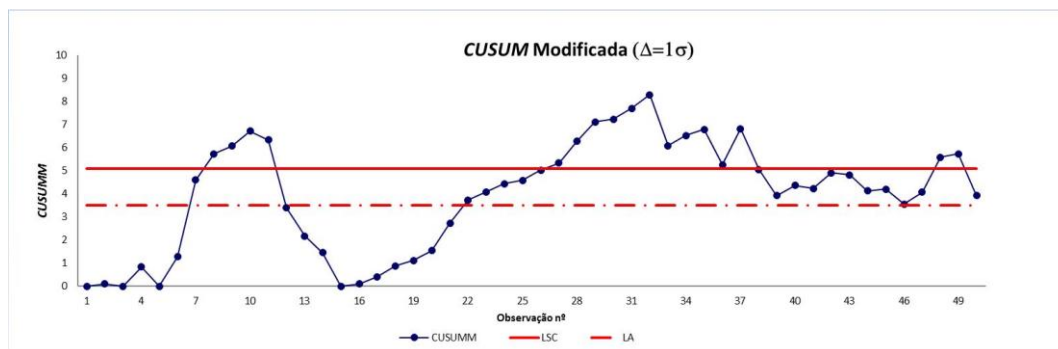


Figura 4.21 Carta *CUSUMM* – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=1\sigma$

Na Figura 4.22, para  $\Delta=1,5\sigma$  a sensibilidade altera-se significativamente sendo que na observação 11 existe necessidade de intervenção de manutenção, mas mais à frente, só nas observações 29 a 32 se verificam registos acima do *LSC*, mas não se volta registar a necessidade de proceder a uma intervenção de investigação nem de manutenção.

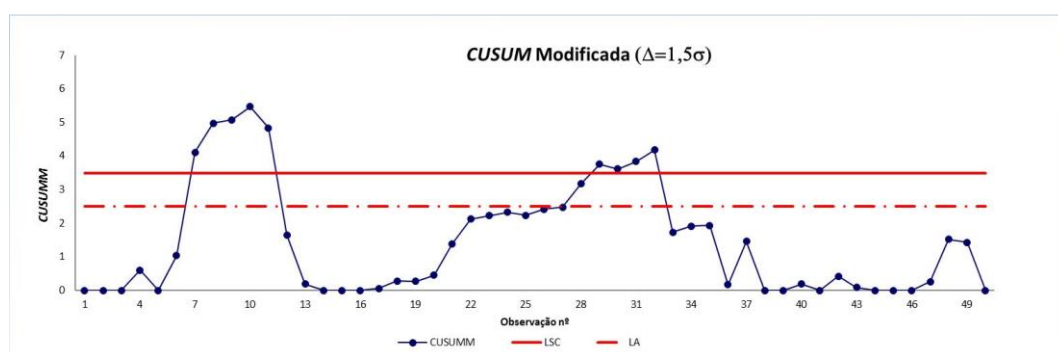


Figura 4.22 Carta *CUSUMM* – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=1,5\sigma$

Analisando a aplicação da carta *CUSUMM* para os três valores de  $\Delta$  considerados, verifica-se que para  $1\sigma$  e  $1,5\sigma$  os valores mais altos (fora do limite) são realçados, enquanto os outros decrescem o valor da estatística. Considera-se neste caso que a aplicação da carta *CUSUMM* para  $0,5\sigma$  apresenta valores mais consistentes, pelo que se recomenda a sua aplicação.

### Cartas *EWMAM*

Para a aplicação das cartas *EWMAM* foram utilizados os valores de  $\lambda$  e  $\delta$  constantes na Tabela 4.8.

O valor de  $(T_L)_N$  é o mesmo que para a carta *CUSUM*; o desvio padrão para os erros de previsão, considerando variações de  $\sigma$ , são os constantes na Tabela 4.9.

Tabela 4.8 Valores de  $\lambda$  e  $\delta$

	$\delta$					
	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5
$\lambda$	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)		

Tabela 4.9 Desvio padrão para erros de previsão

	$\sigma_E$
0,5 $\sigma$	0,005
1 $\sigma$	0,008
1,5 $\sigma$	0,011

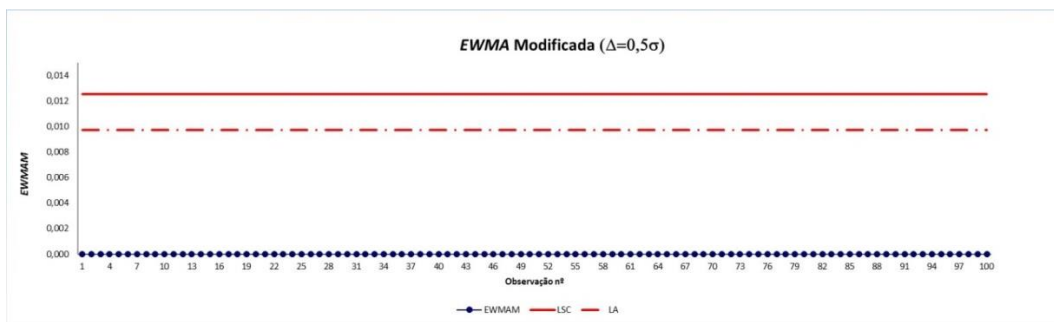


Figura 4.23 Carta *EWMAM* – sem avaria  $\Delta=0,5\sigma$

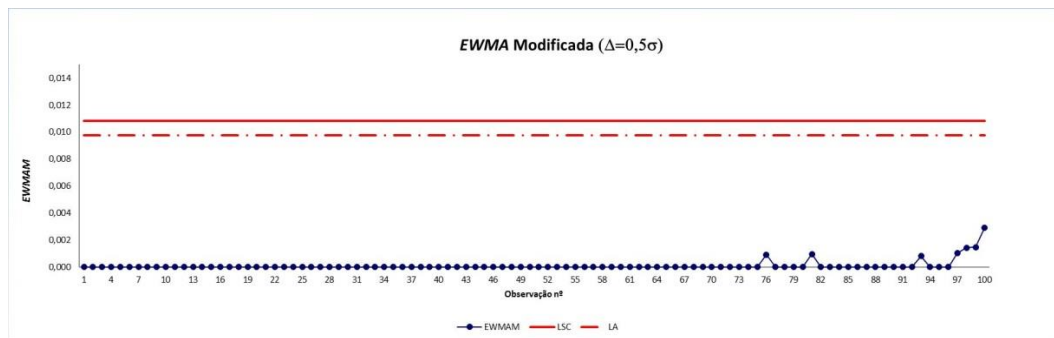


Figura 4.24 Carta *EWMAM* – 1º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

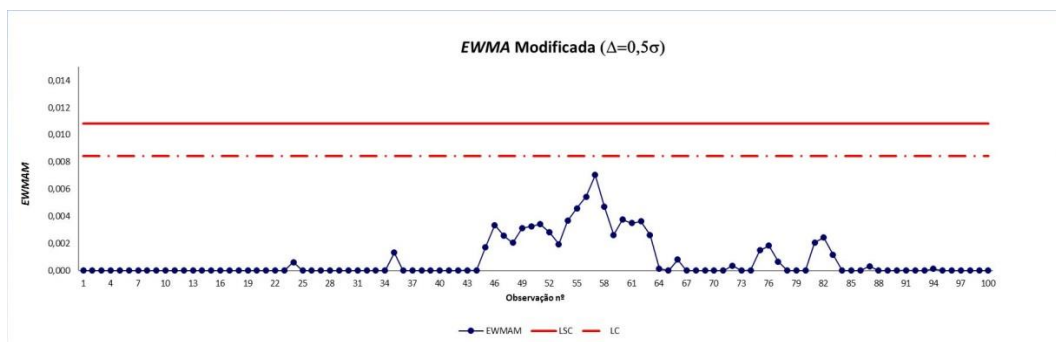


Figura 4.25 Carta EWMAM – 2º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

A carta EWMAM possui um comportamento semelhante à CUSUMM, este pode ser verificado até ao 2º agravamento, Figuras 4.23 a 4.25.

Na Figura 4.26, relativa ao terceiro agravamento, é na observação nª30 que se regista a necessidade de intervenção de investigação. Após isso os valores da vibração decrescem e só se volta a ter observações acima do limite de aviso para a observação nª34 e nª39, mas em nenhuma situação, de acordo com as regras definidas é necessário proceder a uma intervenção.

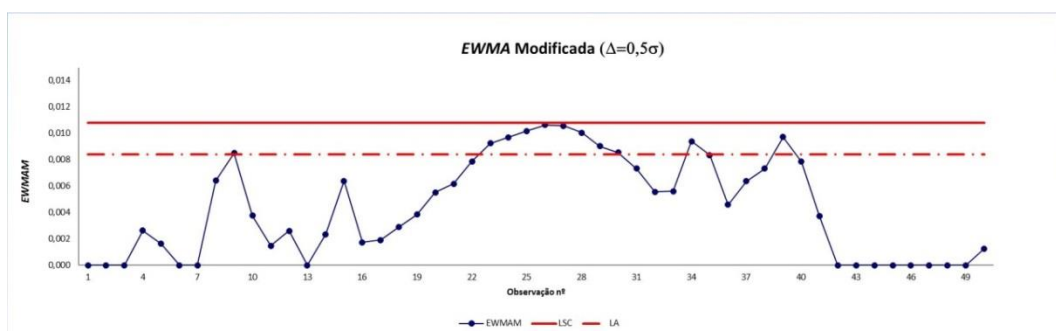


Figura 4.26 Carta EWMAM – 3º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

Para o 4º agravamento, com  $\Delta=0,5\sigma$ , Figura 4.27, somente se regista a necessidade de intervenção de investigação na observação nª29 e entre a observação nª29 até à observação nª38 uma necessidade de ação de manutenção, posteriormente, após isso mantém-se a necessidade de investigação da possível anomalia até ao fim.

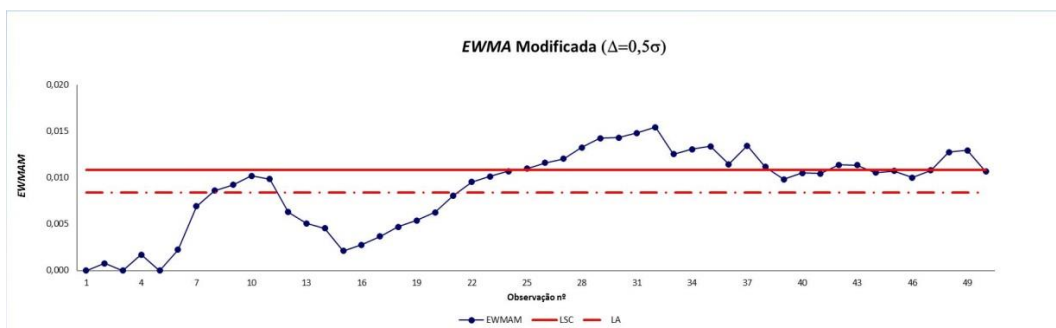


Figura 4.27 Carta EWMAM – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

Para  $\Delta=1\sigma$  (Figura 4.28), tal como para a carta CUSUMM, verifica-se um aumento da sensibilidade quando existem valores mais elevados e um decréscimo nos momentos em que os resultados são

inferiores. Neste caso regista-se a mesma necessidade de intervenção de investigação na observação nº29, e de intervenção de manutenção na observação nº31 e 32.

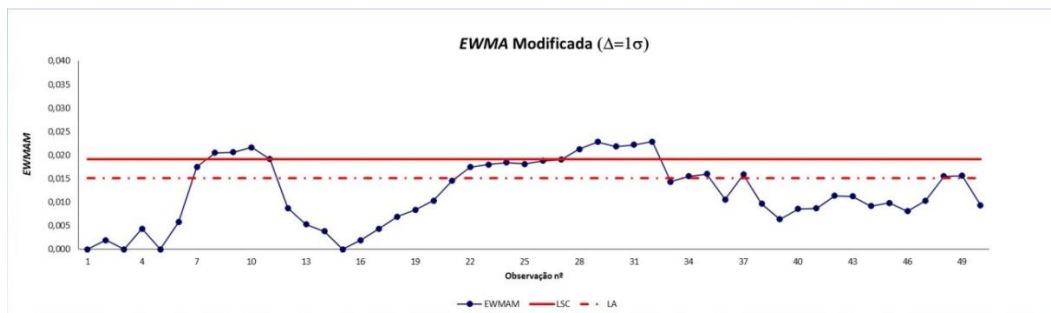


Figura 4.28 Carta *EWMAM* – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=1,0\sigma$

Para  $\Delta=1,5\sigma$  não se regista nenhuma necessidade de intervenção (Figura 4.29) no entanto caso se utilizem cartas com estas características, o operador ou técnico deverá aumentar a frequência de recolha de dados desta variável/equipamento, pois observam-se valores acima do *LSC*.

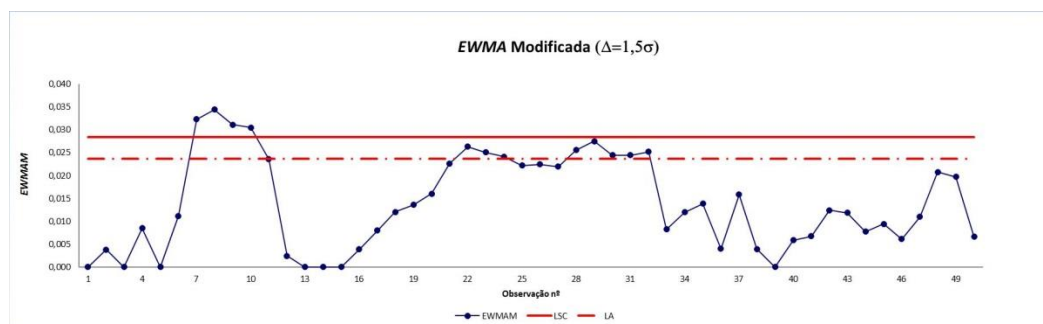


Figura 4.29 Carta *EWMAM* – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=1,5\sigma$

Para  $\Delta=1\sigma$  e  $\Delta=1,5\sigma$  o comportamento dos dados na carta *EWMAM* é semelhante ao da carta *CUSUMM*, em que é verificada uma sensibilidade significativamente inferior. Para este estudo univariado, regista-se que as cartas de controlo *CUSUMM* possuem uma sensibilidade ligeiramente superior à carta *EWMAM*: no caso das primeiras, para  $\Delta=0,5\sigma$ , para o 4º agravamento uma necessidade de investigação é detetada na observação nº 28, enquanto que para as segundas, somente no ponto nº29 existe a necessidade de intervenção de investigação coincidente com a intervenção de manutenção.

#### 4.4 Aplicação de Cartas de Controlo Multivariadas

Para as cartas multivariadas usam-se os mesmos dados: 241 observações individuais, que, conforme o referido na Tabela 3.3 do Capítulo 3, se considera um número adequado

Antes de testar a capacidade do processo para detetar eventuais tendências nos dados recolhidos, deve ser verificada a sua estabilidade (Ledolter & Burril, 1999). É precisamente isto que é realizado na Fase 1, quando se estabelecem os parâmetros do processo, ou nesta dissertação, parâmetros que caracterizam o estado de funcionamento dum equipamento.

Nesta dissertação optou-se por realizar um estudo multivariado com medição de mais que uma variável - *p* - no mesmo ponto; estas deveriam ser observadas no eixo vertical, horizontal e axial de

forma a interpretar com o máximo de rigor a anomalia registada. Na presente bomba, num mesmo ponto, só foram recolhidas observações conforme apresentado na figura 4.3.

Na carta multivariada, os resíduos calculados na Fase 1 das cartas univariadas, vão ser utilizados na Fase 1 multivariada para calcular os parâmetros de funcionamento do equipamento.

Os dados multivariados integram uma série de dados no tempo que é constituída por 4 variáveis e 4 medições respetivas aos pontos selecionados.

#### 4.4.1 Fase 1

##### Cartas $T^2$

Para a aplicação das cartas multivariadas tradicionais seguiu-se a metodologia desenvolvida no Capítulo 3 e utilizaram-se os resultados de resíduos já revistos e erros de previsão do estudo univariado. Na primeira fase foram definidos os parâmetros de funcionamento do equipamento, e definiram-se os limites de controlo, Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Valores de definição de limites

$n$	$p$	$m$	LA		LSC		$(T_L)_{Norma}$
			$\alpha_i$	$\alpha_{ii}$	$\alpha_{iii}$	$\alpha_{iv}$	
1	4	241	1%	3,94%	0,20%	0,80%	1,12

Na primeira Fase, como todos os registos na carta tradicional multivariada se encontram abaixo do limite superior de controlo, Figura 4.30, consideram-se os vetores média e matriz covariância definidos.

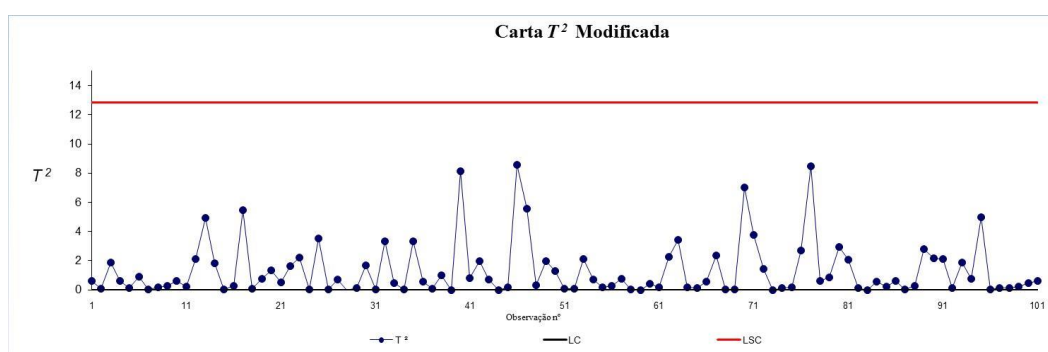


Figura 4.30 Fase 1 - carta  $T^2$

$$\bar{e} = \begin{bmatrix} 0,00033 \\ 0,00005 \\ 0,00034 \\ 0,00041 \end{bmatrix} \quad \bar{X} = \begin{bmatrix} 0,406 \\ 0,4810 \\ 0,7400 \\ 0,5220 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0,000726 & -0,000024 & 0,000137 & 0,000035 \\ -0,000024 & 0,000803 & -0,000114 & 0,000036 \\ 0,000137 & -0,000114 & 0,007102 & 0,000298 \\ 0,000035 & 0,000036 & 0,000298 & 0,001627 \end{bmatrix}$$

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} 1385,34 & 38,256 & -24,938 & -25,947 \\ 38,256 & 1250,37 & 20,733 & -32,208 \\ -24,938 & 20,733 & 142,711 & -26,100 \\ -25,947 & -32,208 & -26,100 & 620,72 \end{bmatrix}$$

#### 4.4.2 Fase 2

Na Fase 2, os limites definidos com base na ISO 2372:2003 e o mesmo valor  $(T_L)_N = 1,12$  do estudo univariado é usado. Mais uma vez as observações são analisadas a partir do primeiro registo. Para o estudo multivariado, independentemente do estado de agravamento da avaria foram somente consideradas as primeiras 50 ( $n = 1$ ) observações para cada estado operacional.

$$(T_L)_j = ((T_L)_N - k\sigma - \mu)_j = \begin{bmatrix} 0,633 \\ 0,560 \\ 0,127 \\ 0,477 \end{bmatrix}$$

#### Cartas $T^2$

Sem avaria, e para o 1º e 2º agravamento não existe de qualquer registo de dados por parte das cartas de controlo, Figura 4.31.

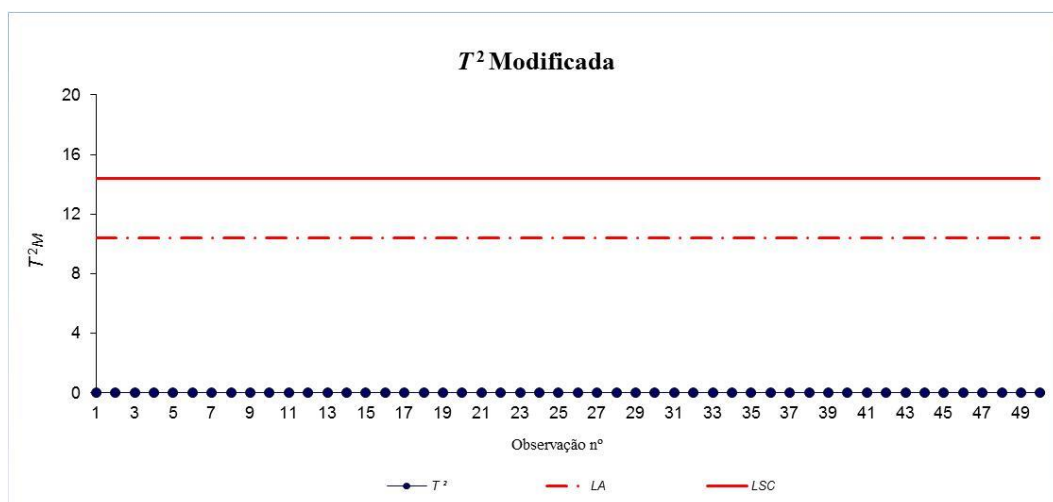


Figura 4.31 Fase 2 - carta  $T^2-0$ , 1º, 2º agravamento da avaria

Para o 3º agravamento existe o registo de três observações, mas com valores insignificantes, Figura 4.32.

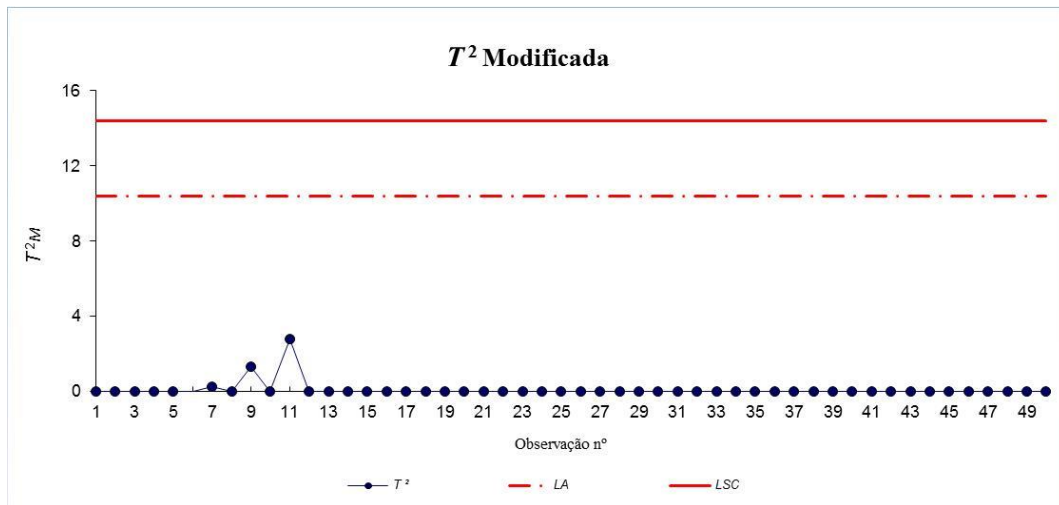


Figura 4.32 Fase 2 - carta  $T^2$  - 3º agravamento da avaria

Na Figura 4.33, que corresponde ao 4º agravamento da anomalia, também nenhuma observação se encontra acima dos limites definidos. Este resultado não correspondeu ao esperado. Comparando com os resultados obtidos para o estudo univariado, existe no entanto um registo coerente, que revela um determinado padrão a partir sensivelmente da observação nº10.

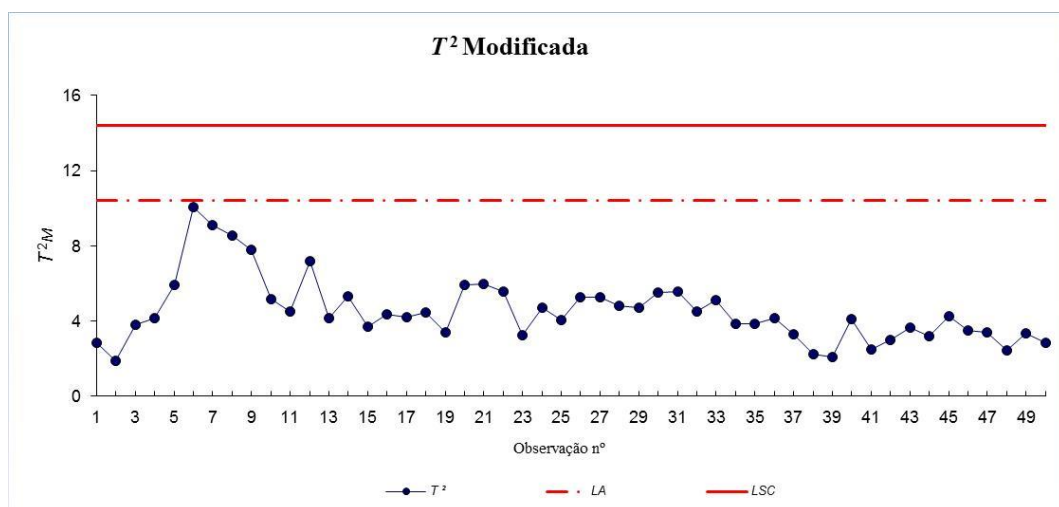


Figura 4.33 Fase 2 - carta  $T^2$  - 4º agravamento da avaria

### **Cartas MCUSUMM**

De acordo com Croisier (1988), para especificar os limites de controlo da carta *MCUSUMM* deve ser consultada a Tabela 3.9 do capítulo 3. Assim obtém-se  $h_l$  como limite de alerta e  $h$  como limite superior de controlo, Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Limite de alerta e limite superior de controlo da carta *MCUSUMM*

<i>AL</i>	<i>UCL</i>
$h_l$	$h$
9,46	10,9

O vetor dos limites,  $T_L$ , considerado para a carta *MCUSUMM* é o mesmo da carta  $T^2$ .

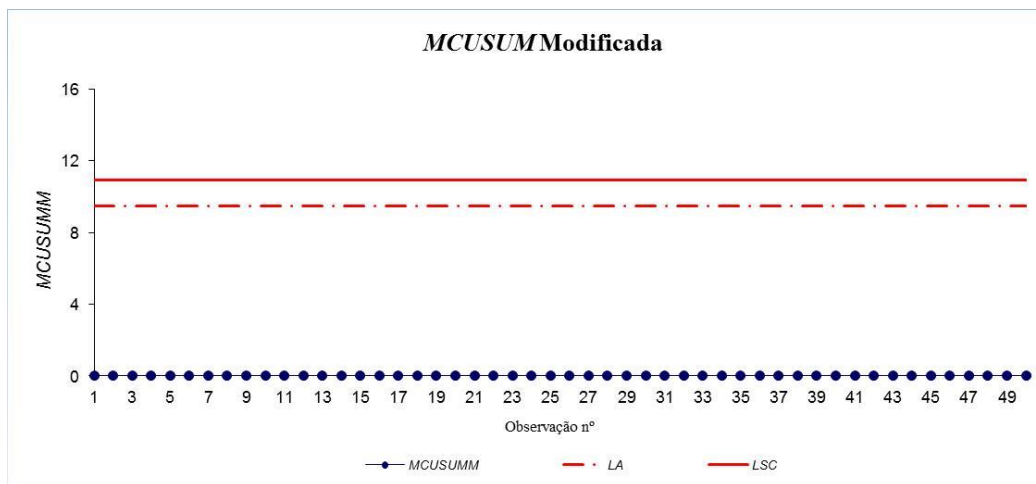


Figura 4.34 Fase 2 - carta *MCUSUMM* – 0, 1º, 2º agravamento da avaria

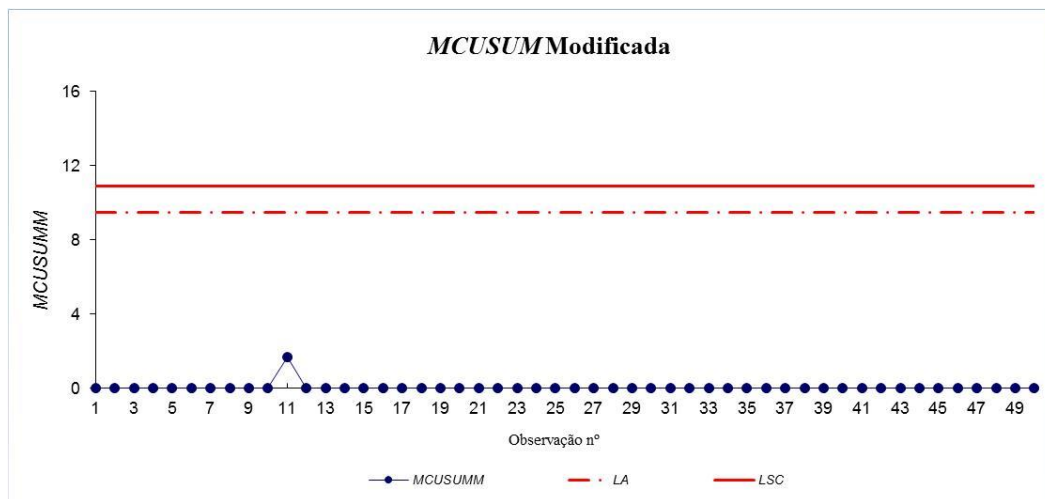


Figura 4.35 Fase 2 - carta *MCUSUMM* – 3º agravamento da avaria

Na Figura 4.34 e 4.35 regista-se um comportamento semelhante ao da carta  $T^2$  com um amortecimento igual dos resultados e sem dados a indicarem a necessidade de intervenção.

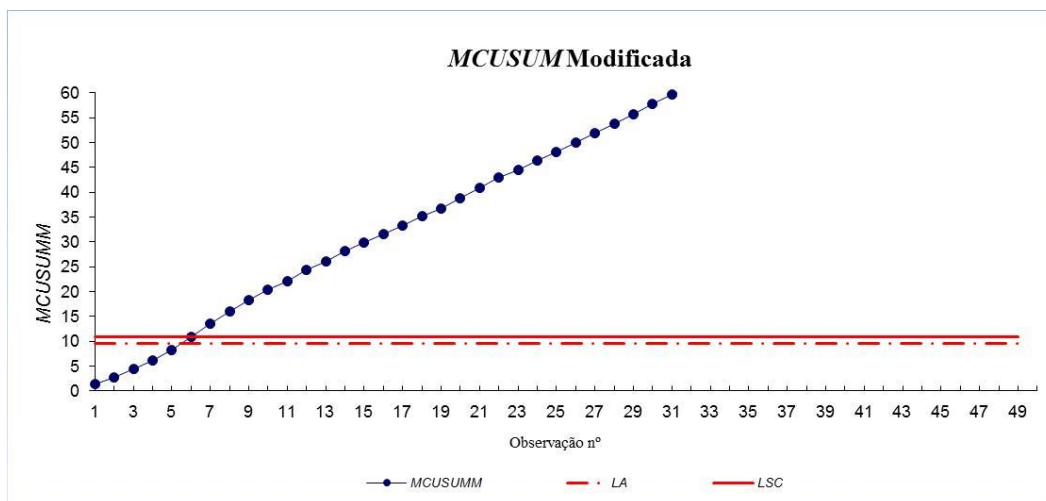


Figura 4.36 Fase 2 - carta *MCUSUMM* - 4º agravamento da avaria

Para o 4º agravamento (Figura 4.36) a carta *MCUSUMM* regista uma sensibilidade bastante elevada e desde a observação nº10, sugere uma intervenção de manutenção, mesmo antes da necessidade de investigação.

**Cartas *MEWMAM***

Os limites da carta de controlo *MEWMAM* foram determinados de acordo com a tabela 4.7 dos ábacos de Crowder (1989), para  $p=4$ . Isto significa que  $K_1$  é o limite de alerta (2,1) e  $K$  (2,7) o limite superior de controlo.

Ao aplicar a carta *MEWMAM* na monitorização do protótipo até ao segundo agravamento de avaria não existe qualquer observação registada na carta. Sendo um resultado coerente de acordo com o apresentado para a carta  $T^2$  e *MCUSUMM*.

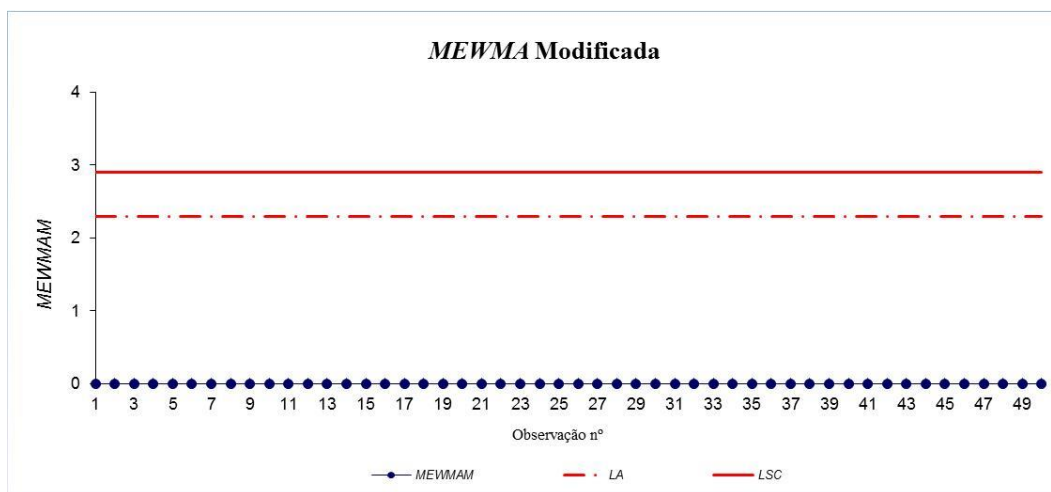


Figura 4.37 Fase 2 - carta *MEWMAM* – 0, 1º, 2º agravamento da avaria

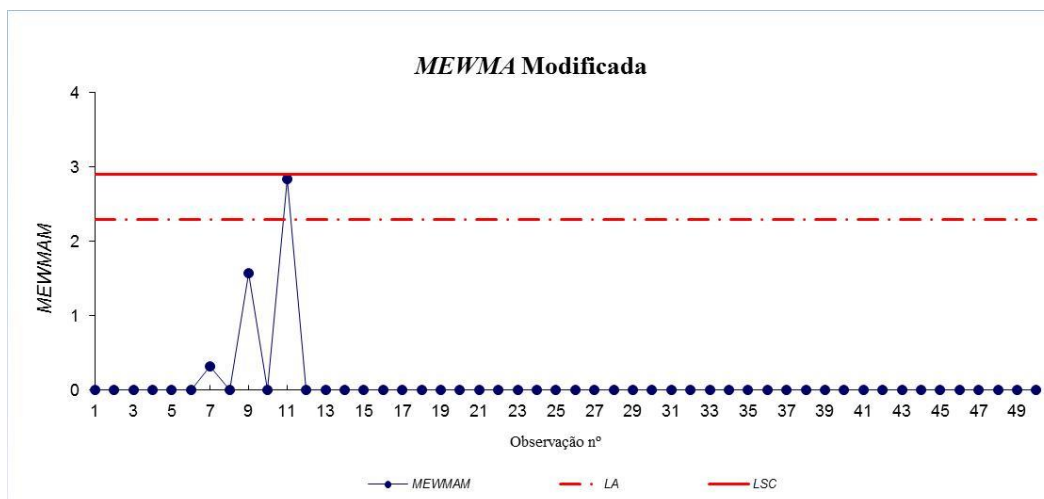


Figura 4.38 Fase 2 - carta *MEWMA* – 3º agravamento da avaria

Para o terceiro agravamento, são registados 3 observações, em que somente para o nº11 o valor é acima do LA, Figura 4.38.

Para o quarto agravamento a carta *MEWMA* apresenta um traçado semelhante à carta  $T^2$ , para  $\lambda=1$  (Figura 4.39). Contudo de acordo com os limites definidos existe a necessidade de proceder a uma intervenção de manutenção na observação nº 7. Verifica-se que mais uma vez a necessidade de manutenção surge antes da de investigação.

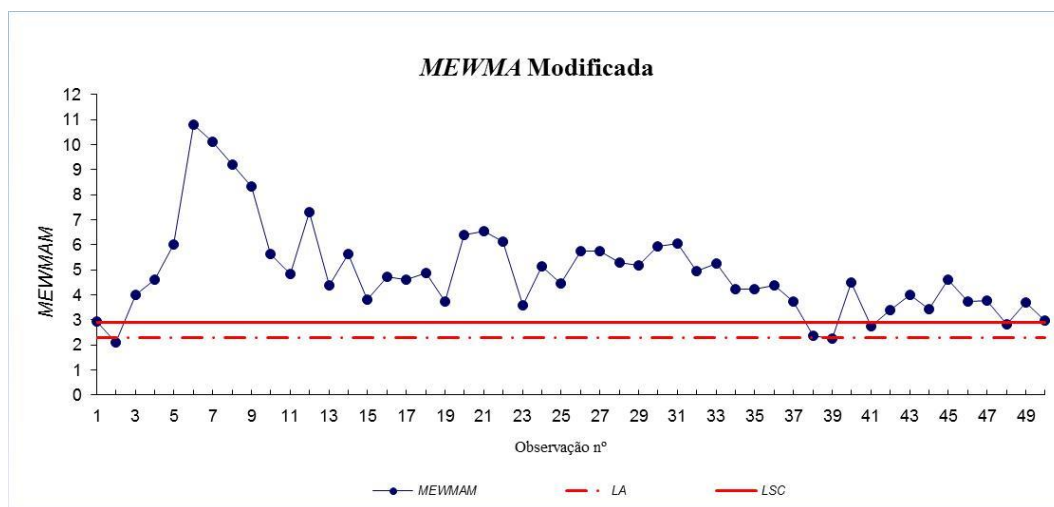


Figura 4.39 Fase 2 - carta *MEWMA* - 4º agravamento da avaria

Para valores de  $\lambda=0,05$ , a carta perde sensibilidade e não regista quaisquer observações acima do LA. Para  $\lambda=0,13$  e  $\lambda=0,25$ , obtém-se resultados mais aceitáveis. Apresenta-se somente  $\lambda=0,13$ , Figura 4.40. No entanto considera-se que para  $\lambda=1$  o resultado é mais adequado, pois para o 3º agravamento, com valores mais baixos de  $\lambda$ , não existem observações a registar.

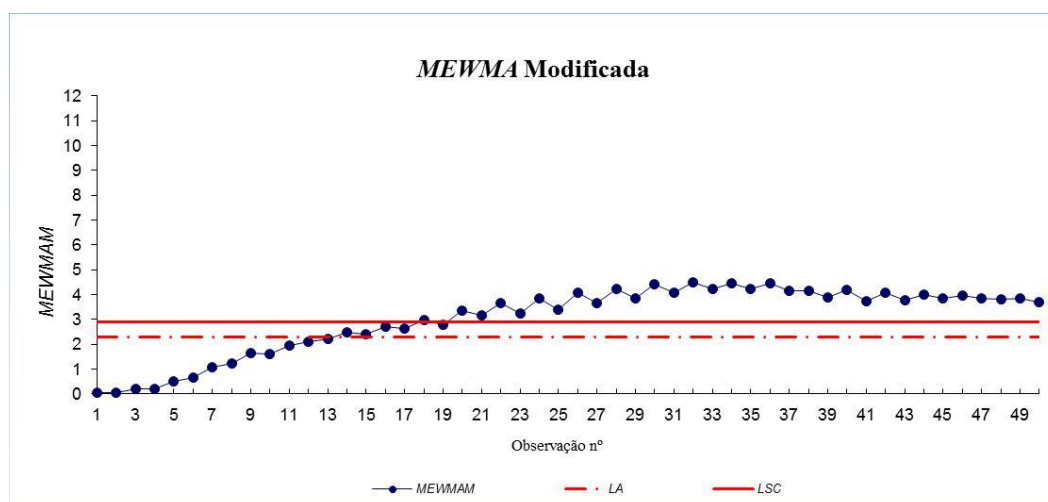


Figura 4.40 Fase 2 - carta *MEWMA* - 4º agravamento da avaria -  $\lambda=0,13$

Face à insensibilidade obtida com a carta  $T^2$ , ao excesso de sensibilidade da carta *MCUSUM* e aos resultados obtidos no estudo univariado, considera-se que as cartas *MEWMA* permitem obter resultado razoável quando aplicadas à monitorização de dados de vibração da eletrobomba em estudo.

#### 4.5 Diagnóstico

Os componentes de um equipamento mecânico podem entrar em rotura como resultado do excesso de carga aplicada ou de outros esforços, que levam à perda de resistência e conseqüente rotura desses componentes (O'Connor, 2011). O componente afetado pode, na maioria das vezes, ser detetado e diagnosticado recorrendo à observação dos espetros de frequência da vibração e da sua incidência de pico em determinada frequência.

Importa referir que o diagnóstico a realizar deve ser complementado com outras técnicas de controlo de condição, de forma a confirmar a anomalia e os componentes específicos que devem ser intervencionados ou substituídos.

Este tipo de diagnóstico também pode e deve ser efetuado *online*. Ao diagnosticar o componente com anomalia podemos eventualmente, através de informação técnica do fabricante, determinar a sua durabilidade.

No caso específico da análise dos espetros da eletrobomba sob investigação, conhecemos a respetiva potência (1,5 kW), velocidade (1500 rpm) e frequência natural (25Hz). A análise vai ser efetuada para a Var2.

Não se introduzindo anomalias, apenas a frequência natural de 25 Hz é registada, verificando-se o aparecimento de alguns sinais de ressonância entre os valores de 1750 Hz e 2250 Hz e entre 2250 Hz e 2750 Hz, Figura 4.41.

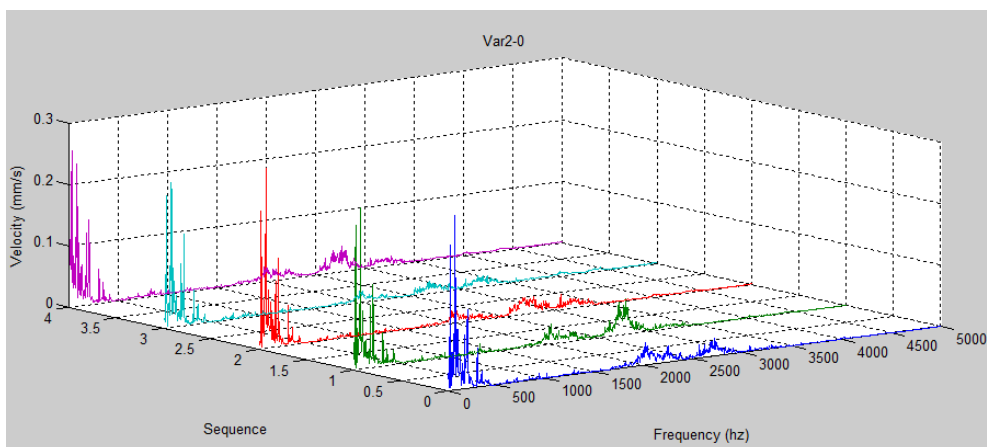


Figura 4.41 Análise de frequência – sem avaria.

Para o primeiro estágio de agravamento, não são registadas grandes modificações, verificando-se o mesmo pico para 25 Hz e depois sinais de ressonância entre os mesmos valores de frequência, Figura 4.42.

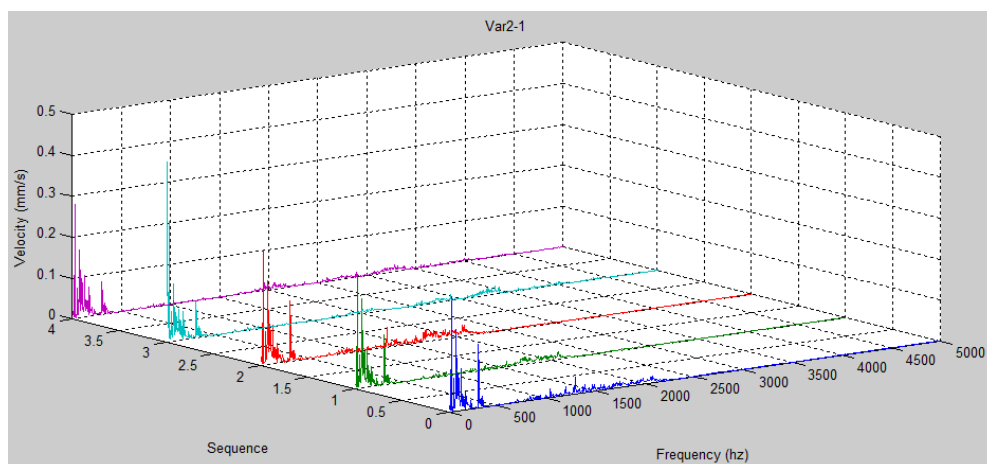


Figura 4.42 Análise de frequência – 1º agravamento

Para o 2º agravamento os valores de vibração aumentam e regista-se um pico nos 300Hz (12x), Figura 4.43. e a ressonância aparece entre 1750 e 2250 Hz.

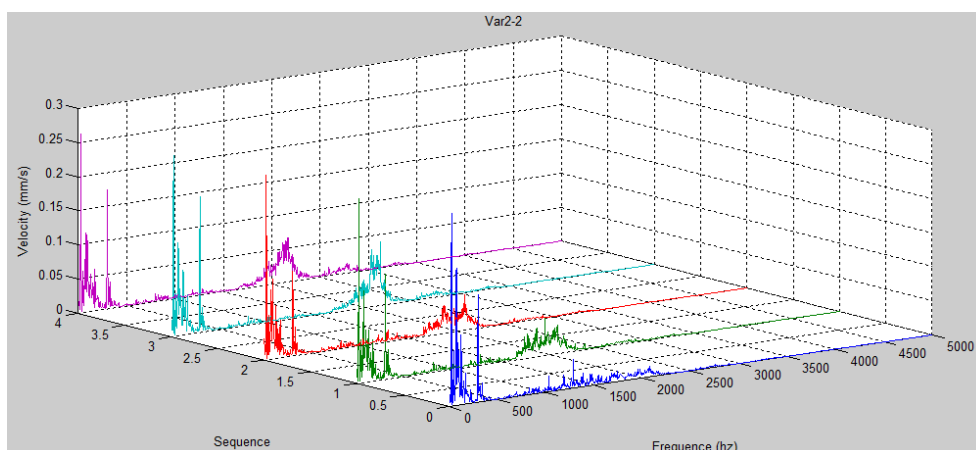


Figura 4.43 Análise de frequência – 2º agravamento

Os picos de frequência registados podem indicar problema de folga em rolamentos, excentricidade no veio ou anomalias nas pás do rotor.

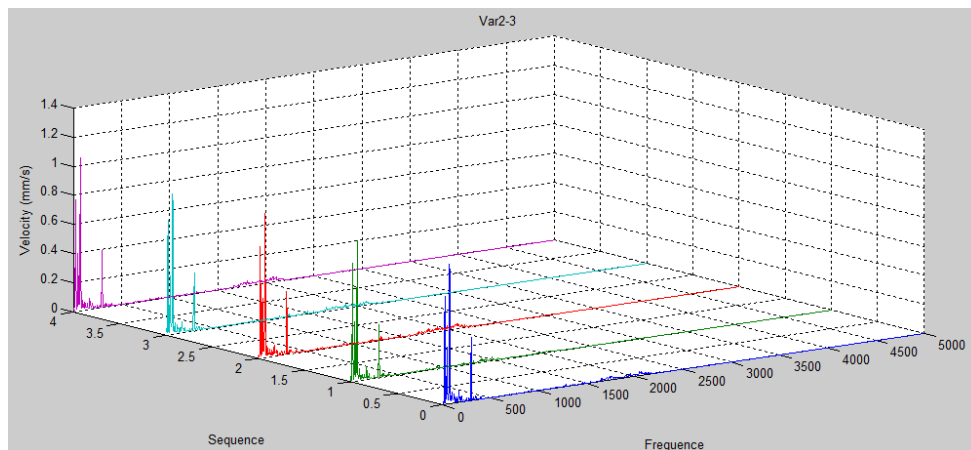


Figura 4.44 Análise de frequência – 3º agravamento

No 3º agravamento os valores de vibração aumentam significativamente, Figura 4.44.

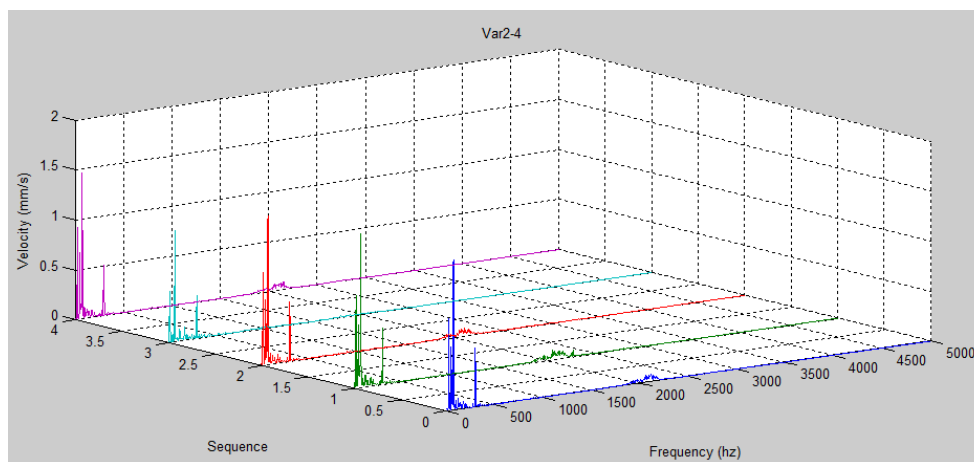


Figura 4.45 Análise de frequência – 4º agravamento

No 4º agravamento regista-se um agravamento do estado anterior, onde se verifica um pico aos 300 Hz com 0,13mm/s (12x), Figura 4.45. Os picos com 25 Hz e 75 Hz que representam respetivamente as ordens 1x e 3x.

Sendo a frequência natural de 25hz, os picos registados em torno desta frequência podem ser causados pelo desaperto dos parafusos de apoio do motor. A presença de vários picos depende, possivelmente, não apenas de uma mas de várias causas, provocadas pelo desaperto. A anomalia introduzida pode ter ocasionado, por exemplo, o desalinhamento entre a bomba e o motor elétrico e o desequilíbrio no rotor. Se este fosse um equipamento selecionado que estivesse a ser monitorizado *online*, esta situação deveria ser acompanhada, de forma a verificar a tendência. Se o agravamento continuasse seria recomendada a desmontagem da eletrobomba e o controlo dimensional dos vários componentes, procedendo à substituição ou reparação dos que se encontrassem danificados. Como a vibração em equipamentos deste tipo pode ter causas diferentes, devem ser utilizadas técnicas de diagnóstico complementar (VDI, 1982).

#### 4.6 Considerações

Se estivermos a falar de equipamentos seleccionados e vitais para uma linha de produção ou para a operacionalidade de um navio, sugere-se que seja utilizado um sistema de recolha e tratamento de dados fixo com controlo remoto, como o sistema apresentado por Solomon (1999) e adaptado na Figura 4.46.

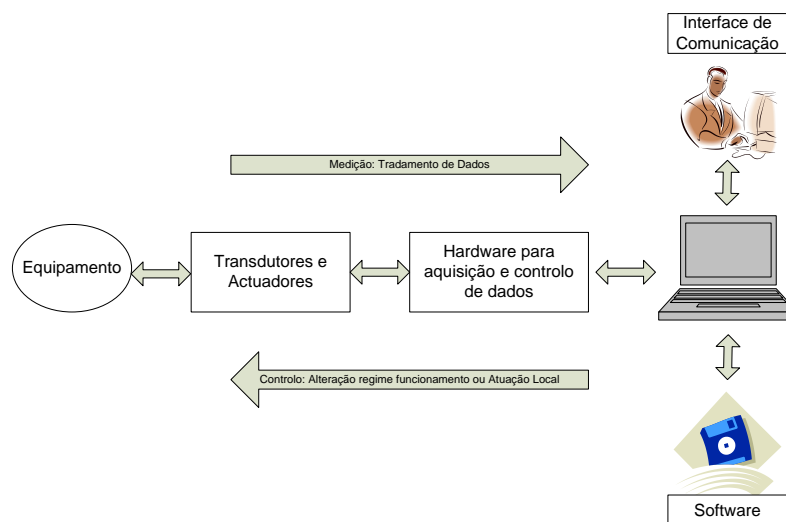


Figura 4.46 Integração de sistema controlo (Adaptação de: Solomon, 1999)

Em relação ao estudo univariado, foi verificado que tanto a carta *CUSUMM* como a carta *EWMAM* possuem uma sensibilidade adequada no acompanhamento *online* de valores de vibração da eletrobomba, apresentando a carta *CUSUMM* uma sensibilidade ligeiramente superior; os resultados mais positivos foram obtidos para  $\Delta=0,5\sigma$ . No entanto, pode-se relevar as observações com valores mais elevados e, eventualmente, nesse caso, a variação do  $\Delta$  possa ser utilizada para retirar conclusões ou decisões de intervenção.

Relativamente ao estudo multivariado, a carta tradicional  $T^2$ , para a aplicação à eletrobomba não demonstrou sensibilidade adequada. A carta *MCUSUMM* revelou uma sensibilidade bastante elevada, mas é a *MEWMAM* que apresenta um resultado mais adequado, pelo que se recomenda a sua aplicação no acompanhamento de condição com dados multivariados, mas não em detrimento do estudo individual de cada variável.

Relativamente ao diagnóstico, verificou-se a aplicabilidade de uma análise espectral de dados de vibração recolhidos para os quatro agravamentos de anomalia. Em caso de dúvidas no diagnóstico esta deverá, no entanto, ser acompanhada de técnicas complementares.

Considera-se que as técnicas desenvolvidas são aplicáveis à monitorização de equipamentos. Para aplicar estas técnicas uma filosofia de manutenção condicionada *online* deve haver uma adaptação do sistema de recolha e tratamento de dados da organização (*SICALN*) ao sistema de recolha de dados automático nos navios (no presente caso o *NAUTOS*), com parametrização e representação gráfica de tendências.

Deve-se ter em consideração que a decisão de intervir deve ser tomada com máximo de critérios e de alternativas conhecidas, evitando intervenções tecnicamente desnecessárias.

Importa referir ainda que, o modelo pode ser alterado e adaptado ao longo do processo, de forma a melhorar a sua aplicabilidade e obter resultados mais fidedignos e reais.



---

## **CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A MÁQUINAS PROPULSORAS**

---

*“Nas machinas é principio essencial serem os movimentos perturbadores impedidos por forças interiores... Efeito dinamico das machinas. Dá-se este nome, ou o de trabalho dinamico ao trabalho total resistente, tomando em valor absoluto, recebido pela machina, dos corpos exteriores submetidos à sua acção.”*  
(Escola Naval, 1904)



## CAPÍTULO 5

### 5.1 Caraterísticas das Máquinas Propulsoras

### 5.2 Aplicação da Metodologia a Turbinas a Gás

### 5.3 Aplicação da Metodologia a Motores Diesel

### 5.4 Aplicação das Cartas para Amostras Grandes com Simulação Dados

### 5.5 Considerações

#### 5.1. Caraterísticas das Máquinas Propulsoras

As máquinas selecionadas para o estudo são duas turbinas a gás e dois motores propulsores *diesel*. No caso das turbinas as cartas  $Q$  são aplicadas a dados de vibração. No caso dos motores propulsores as cartas  $Q$  são aplicadas a vários tipos de variáveis representativas do seu controlo de funcionamento.

Na recolha de dados relativos a motores propulsores de navios podem ocorrer influências várias nas leituras que podem originar *outliers*. Especificamente, no caso das vibrações, podem esporadicamente ocorrer registos que saem dos limites esperados, *outliers* cujas causas podem ser:

- Navio estar a mudar de direção;
- Mau estado do mar;
- Alterações ao regime de velocidade.

##### 5.1.1 Turbinas a Gás

As turbinas a gás sob investigação são turbinas aeroderivadas que fazem parte da propulsão do navio, cujas caraterísticas são (Marinha-ETNA, 2010a):

- Tipo *Split-shaft*, com ligação termodinâmica;
- Eficiência térmica de 37%;
- Potência Máxima de 19.575 kW (30,420 cv);
- Velocidade de saída de 3600 rpm;
- Consumo específico de 168 gr/cv.h;
- Temperatura de evacuação de 530°C;
- Peso de 4676 kg;
- Dimensões de 21345 mm x 2134 mm x 6629 mm.

A turbina divide-se em duas partes principais: o Gerador de Gases (GG) e a Turbina de Potência (PT). O GG é constituído por um compressor, uma câmara de combustão e uma turbina de alta pressão (High Pressure Turbine - HPT)

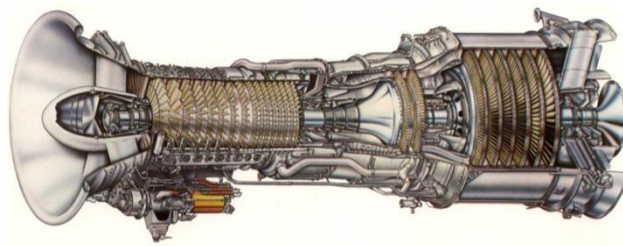


Figura 5.1 Turbina a gás (Fonte: Centerfield, 2013)

A turbina a gás na qual foram aplicadas algumas das metodologias desenvolvidas possui, para além de outros, quatro sensores de vibração que permitem a leitura através de transdutores. Estes sensores das turbinas foram os únicos analisados nesta dissertação e encontram-se descritos na tabela 5.1.

Tabela 5.1 Sensores das turbinas a gás em investigação

Sensor	Definição
SNV0374	TG1-Gases Generator (GG) – Self Vibration
SNV0375	TG1-Gases Generator – Vibration Induced by Power Turbine (PT)
SNV0376	TG1-Power Turbine – Vibration induced by GG
SNV0377	TG1-Power Turbine – Self Vibration
SNV0474	TG2-Gases Generator (GG) – Self Vibration
SNV0475	TG2-Gases Generator – Vibration Induced by Power Turbine (PT)
SNV0476	TG2-Power Turbine – Vibration induced by GG
SNV0477	TG2-Power Turbine – Self Vibration

Os valores detetados pelos sensores são recolhidos através do sistema *Naval Automation System (NAUTOS)*. Tal como outros parâmetros (ex: temperaturas, pressões, etc) são registados em computador e acompanhados em monitores numa sala de Comando e Controlo.

Os navios mais modernos permitem a leitura de vibrações e de outros parâmetros de funcionamento de máquinas rotativas específicas seleccionadas. Para além da leitura destes parâmetros existem situações em que os dados são analisados de forma *offline*. A existência da metodologia estatística desenvolvida no Capítulo 3 pode facilitar a deteção de eventuais tendências para a anomalia, de forma *online*. Este capítulo vai-se centrar essencialmente na aplicabilidade da metodologia desenvolvida para as cartas  $Q$  e, na fase final demonstrar a aplicação das cartas multivariadas tradicionais e especiais.

Ao aplicarmos as cartas  $Q$  só se considera uma fase em virtude das amostras utilizadas serem pequenas.

As turbinas em estudo, sendo construídas em série, são fornecidas pelo fabricante com os limites de vibração pré-definidos, antes da instalação a bordo; o que cumpre alguns requisitos definidos por Montgomery (2012) segundo o qual, no caso do controlo de processos, o controlo estatístico deve ter início o mais cedo possível. Se no futuro, nas provas em banco das turbinas a gás, as cartas de controlo forem aplicadas logo nas primeiras recolhas de dados, aquando da sua instalação num sistema (ex: navio ou aeronave), estas podem servir de base para controlo da condição do equipamento *online*.

A ISO-13380 de 2002 refere ainda uma série de anomalias típicas a que as aeroturbinas podem estar sujeitas (Tabela V.1 do Anexo V) e que são aplicáveis às marítimas, este normativo revela que muitas anomalias detetadas se manifestam através da alteração do valor da vibração.

No caso destas turbinas os valores de vibração são expressos na unidade “mils”. Para o GG o valor limite de alarme é de 4 mils e para a PT de 7 mils. Para 7 mils do GG e 10 mils da PT a turbina a gás vai para *idle*. Nesta investigação os dados a serem tratados são convertidos para mm (milímetros) uma vez que é a unidade normalmente utilizada na análise de vibrações. Acresce referir que nas turbinas a gás, sendo máquinas de elevada rotação, têm tolerâncias de vibração menores: uma pequena vibração pode evoluir muito rapidamente para valores superiores, conduzindo à avaria (Mechefske, 2005). Por essas razões, os limites do fabricante devem ser rigorosamente respeitados.

Na tabela seguinte apresentam-se os limites definidos pelo fabricante em mm:

Tabela 5.2 Limites de vibração da turbina

	Alarme	Paragem de Emergência
SNV0374/SNV0474	101,6	177,8
SNV0375/SNV0475	177,8	254
SNV0376/SNV0476	101,6	177,8
SNV0377/SNV0377	177,8	254

Os dados utilizados na investigação são resultado de registos efetuados no passado contudo, estes dados, não têm sido tratados estatisticamente não obstante, existirem metodologias desenvolvidas para tratamento dos dados do NAUTOS, estas não têm sido utilizadas.

Importa referir que, à data da recolha de dados, a turbina TG1 encontrava-se em boas condições, mas, no caso da TG2, existia uma anomalia identificada, podendo esta ser detetada aplicando as cartas desenvolvidas.

Se considerarmos o controlo de todos os sistemas ligados ao funcionamento da turbina a gás, outros subsistemas devem ser considerados. Assim, por exemplo, na turbina a gás localizada a bordo dos navios envolvidos, outros subsistemas, como o *LOSCA (Lube Oil Storage and Conditioning Assembly)*, são vitais para o controlo do funcionamento das turbinas referidas. Isto significa que a respetiva condição depende não só da máquina propriamente dita, mas também da condição dos sistemas auxiliares. Nesta investigação, apenas os parâmetros da máquina serão considerados. A extensão do estudo aos subsistemas pode ser importante, na medida em que pode estar envolvida a

causa de um determinado sintoma. Não considerar os subsistemas poderá conduzir a uma manutenção imperfeita; no entanto, considerou-se que os fatores diretamente relacionados com a turbina têm um peso superior.

De acordo com a ISO-13380 (2002) as aeroturbinas podem ter uma série de avarias típicas. No caso da turbina 2, de acordo com registos de manutenção e diagnóstico efetuado por um técnico e meios específicos, sabe-se que anomalia observada deveu-se a um desequilíbrio (*unbalance*) no compressor. Outras avarias típicas em aeroturbinas podem ser consultadas no Anexo V.

### 5.1.2 Motores Diesel

A proposta desta metodologia, para monitorização *online* de equipamentos, será também aplicada aos motores *diesel* propulsores (Figura 5.2), aos quais se dedicam os próximos parágrafos. Os dois motores *diesel* em estudo, são motores MTU 1163, com 12 cilindros em V, sobrealimentados e com as características constantes na Tabela 5.3 (Marinha-ETNA, 2010b).

Tabela 5.3 Características motores *diesel* sob estudo (Marinha-ETNA, 2010b)

Caraterística	Valores
Potência contínua	3250 kW a 1160 rpm
Método de operação	4 tempos simples efeito
Cilindrada unitária	11.63 litros
Velocidade do êmbolo às 1100 rpm	10.26 m/s
Modo de sobrealimentação	Sistema sequencial de estágio único
Sentido de rotação (visto do volante)	Ponteiros do relógio não reversível



Figura 5.2 Motor *Diesel* (MTU, 2013)

Tabela 5.4 Sensores do motor

Caraterística	Valores
OP0155	DE1 LUB OIL PRESSURE (Bar)
OT0114	DE1 LUB OIL TEMP (°C)
OP0157	DE1 PISTON COOLING OIL PRESS (Bar)
FP0163	DE1 FUEL OIL PRESS (Bar)
OP0255	DE2 LUB OIL PRESSURE (Bar)
OT0214	DE2 LUB OIL TEMP (°C)
OP0257	DE2 PISTON COOLING OIL PRESS (Bar)
FP0263	DE2 FUEL OIL PRESS (Bar)

Os valores das pressões estão expressos em bar e os das temperaturas em graus celsius (°C).

Tabela 5.5 Limites dos sensores

		Limite Aviso	Alarme
MD1	OP0155	5,5	4,5
	OT0114	-	85
	OP0157	5,5	4,5
	FP0163	-	0,5
MD2	OP0255	5,5	4,5
	OT0214	-	85
	OP0257	5,5	4,5
	FP0263	-	0,5

De referir que o sistema automático de Comando e Controlo associado aos motores *diesel* é o *NAUTOS* e é através dele que são extraídos os valores dos parâmetros de cada sensor.

## 5.2 Aplicação da Metodologia a Turbinas a Gás

Nesta dissertação, dada a forma como os dados foram obtidos, não será possível aplicar a análise espectral para as turbinas: os dados estão expressos em valores globais. Ainda que esta dificuldade fosse superável, exigiria a utilização de recursos inexistentes no âmbito desta investigação

Antes de iniciar a aplicação prática do MEC às turbinas a gás e aos motores *diesel*, importa referir que a mudança de estado e quantidade de observações assume particular importância quando escolhemos aplicar a metodologia das cartas de controlo modificadas a equipamentos, considerando que equipamento altera o respetivo estado em função do tempo. Neste sentido, por forma a otimizar a monitorização *online* podem e devem ser efetuadas alterações na metodologia de controlo ao longo da vida útil dos equipamentos, ajustando-o ao estado do equipamento, à quantidade de dados existentes e às especificações do utilizador do equipamento.

### 5.2.1 Aplicação das Cartas Controlo QM a Turbinas a Gás

Verifica-se que a aplicação aos dados reais recolhidos nos vários sensores, da metodologia desenvolvida no Capítulo 3, para as cartas *short run*, justifica a aplicação das cartas modificadas, a este tipo de máquinas. De referir que o número de amostras considerado para cada um dos sensores foi de 50. As leituras dos sensores de vibração, das turbinas a gás consideradas, foram para o compressor a 8000 rpm.

Apresenta-se neste capítulo os resultados da aplicação ao sensor SNV0474 da TG2, obtendo-se a Figura 5.3, que, 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 Figura 5.3. Apesar do estado da turbina não aconteceu nenhuma anomalia grave porque o respetivo funcionamento foi limitado em potência e em tempo de operação.

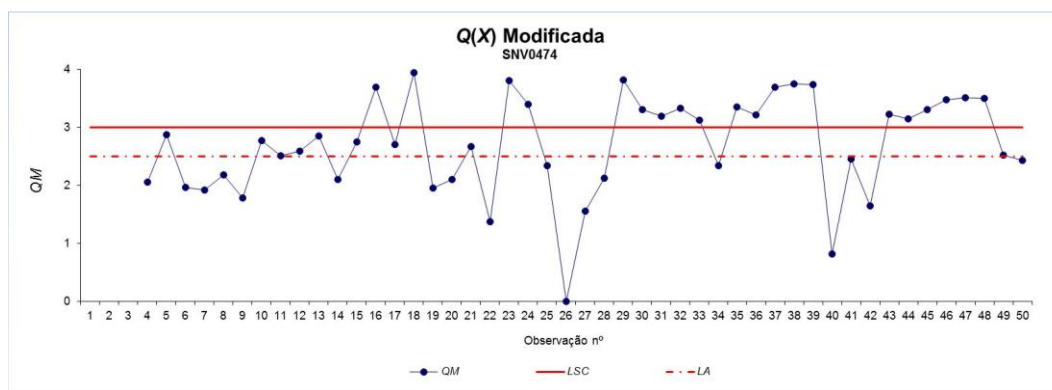


Figura 5.3 Carta *QM* para sensor SNV0474

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 5.4).

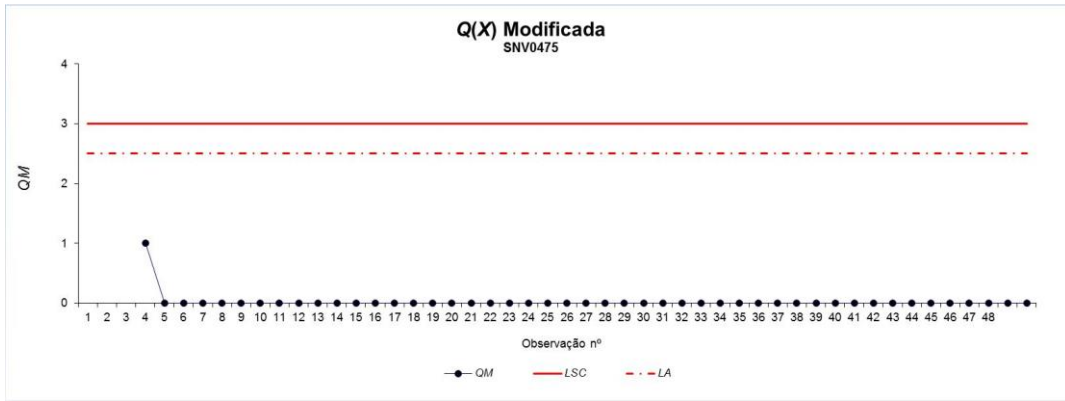


Figura 5.4 Carta QM para sensor SNV0475

No caso do sensor SNV0476 verificam-se registos, pois estes representam as vibrações que o gerador de gases induz na turbina de potência. De acordo com a metodologia definida, dado que apenas existe uma observação acima do LSC, não há necessidade de intervenção. Caso existissem observações registadas, teríamos que ter em consideração, que as vibrações estariam a ser induzidas pelo compressor, e que estas poderiam provocar também a degradação da turbina, pelo que ter-se-ia clarificar se a necessidade de intervenção recairia somente sobre o compressor, ou se a própria turbina já necessitava de intervenção (Figura 5.5).

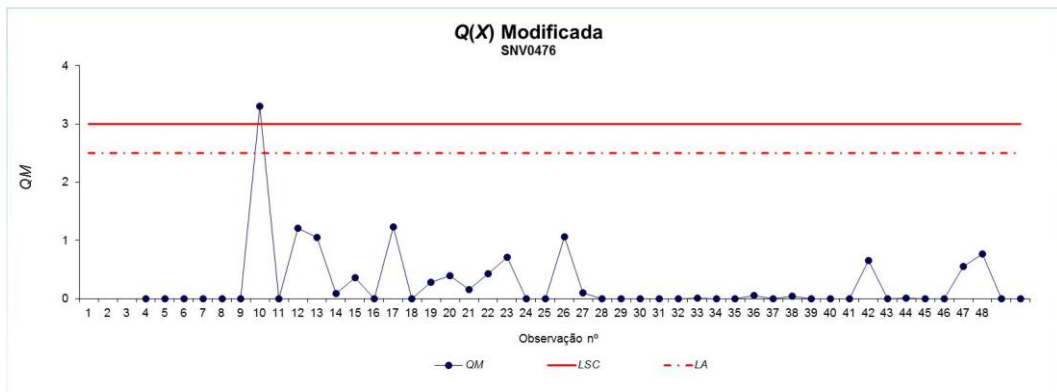


Figura 5.5 Carta QM para sensor SNV0476

Para o sensor SNV0477 não existe qualquer registo, pelo que representa o fato de não existir nenhuma anomalia na turbina de potência, o que vai de encontro à situação que se registou nesta turbina aquando da recolha dos dados, desequilíbrio no compressor (Figura 5.6).

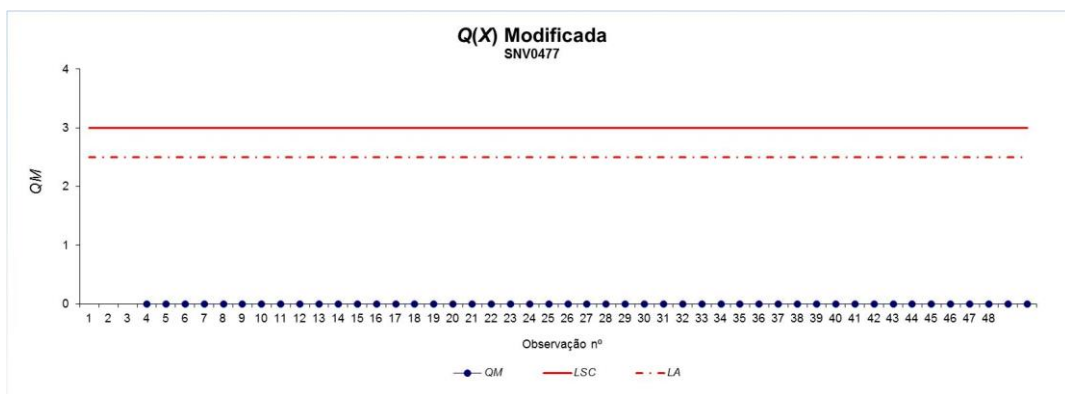


Figura 5.6 Carta QM para sensor SNV0477

5.2.2 Aplicação da Carta Controle CUSUMQM a Turbinas a Gás

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

Para a presente dissertação, foram considerados  $\alpha = 1\%$  ( $ARL = 100$ ) na definição de LA e  $\alpha = 0,2\%$  ( $ARL = 500$ )

Tabela 5.6 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 5.6, onde apenas foram acrescentados dois valores para observação o  $k=0,25$  e  $k=0,75$  e não foi utilizado o  $k=1,5$ . A Figura 5.7 regista necessidade de proceder a uma intervenção de manutenção desde a observação 9.

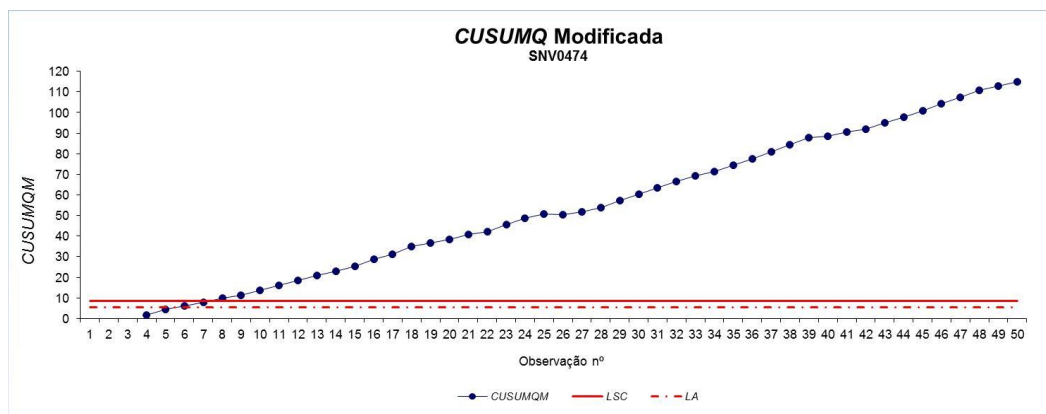


Figura 5.7 Carta CUSUMQM para sensor SNV0474 para  $k=0,25$

Na Figura 5.8, para o sensor SNV0476, considerou-se um  $k=0,25$ , que será o utilizado para as cartas CUSUMQM aplicadas a equipamentos. Pode-se ver em anexo V o exemplo de aplicação com outros  $k$ , contudo regista-se uma sensibilidade inferior.

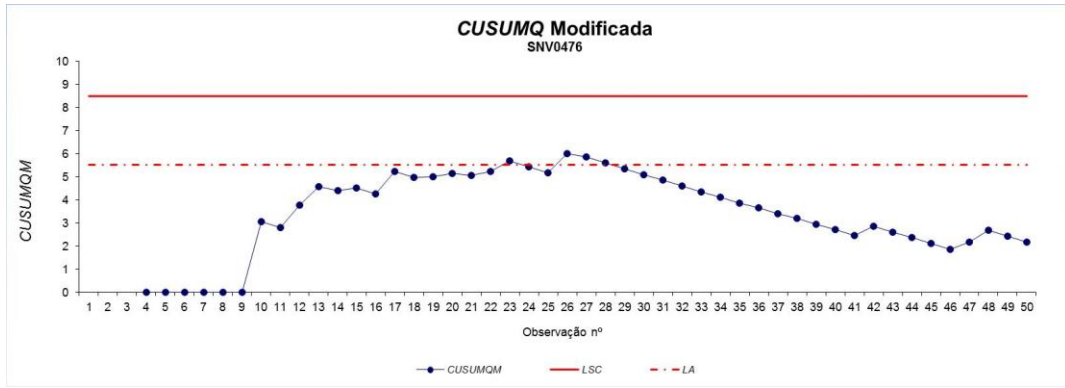


Figura 5.8 Carta *CUSUMQM* para sensor SNV0476 com  $k=0,25$

De referir que seguindo a metodologia definida para as cartas *CUSUMQM* relativamente à TG1 registou-se também a necessidade de intervenção a partir da observação 27 (Anexo V), o que na realidade não traduz um resultado muito credível. Poderá traduzir que estamos perante um aumento de vibrações da turbina a gás, de acordo com o resultado do sensor SNV0374, mas de fato não existe necessidade de intervenção. Pelo que foi verificado, não se recomenda a aplicação das cartas cumulativas - neste caso as *CUSUMQM* - a estes equipamentos, mesmo com ajustamentos no valor de  $k$ , pois podem conduzir a intervenções desnecessárias.

### 5.2.3 Aplicação Carta Controlo EWMAQM a Turbinas a Gás

Para a aplicação das cartas *EWMAQM* foram utilizados os valores de  $\lambda$  e  $K$  da Tabela 4.8 do capítulo 4.

De referir que incluindo este Capítulo e o Anexo V, somente se representa os sensores SNV0474 e SNV0476 porque os restantes, tal como para a carta  $Q$  não apresentam qualquer observação registada.

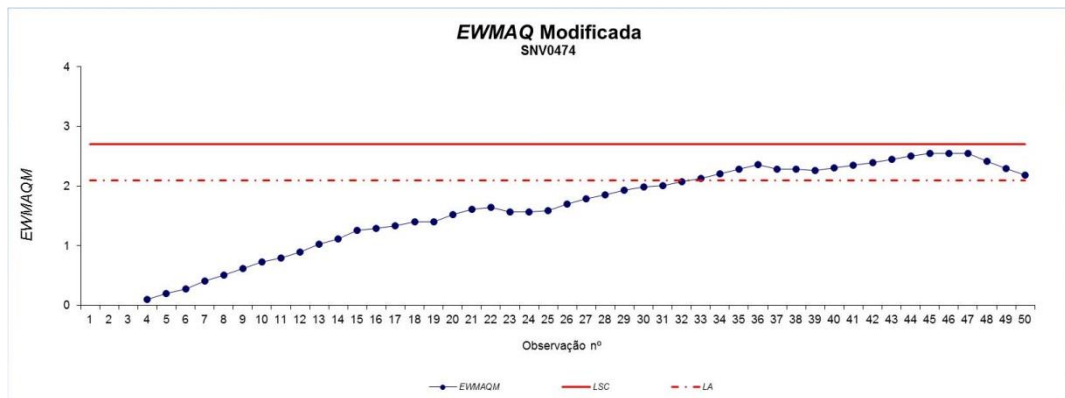


Figura 5.9 Carta *EWMAQM* para sensor SNV0474 com  $\lambda=0,05$

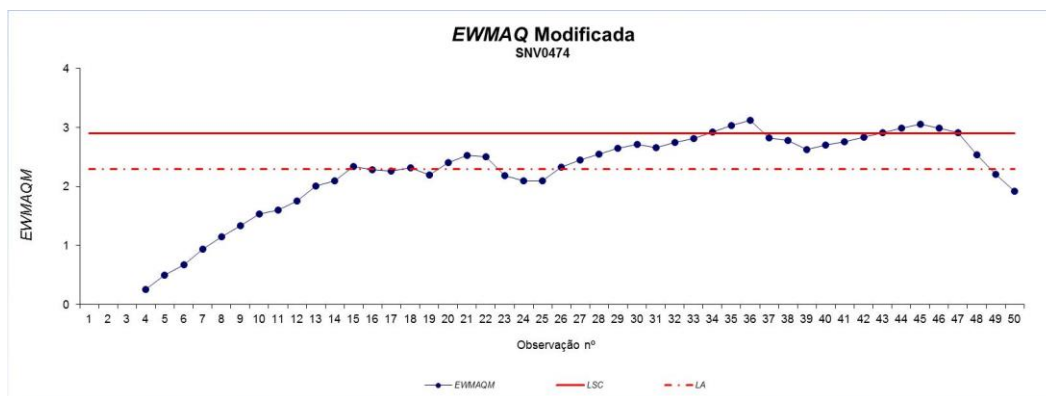


Figura 5.10 Carta *EWMAQM* para sensor SNV0474 com  $\lambda=0,13$

A carta *EWMAQM* varia em função de  $\lambda$ , atingindo a maior sensibilidade para  $\lambda=0,25$ . A carta mostra (Figura 5.11) desde a observação 17 a 18, 5 observações consecutivas acima do *LA*, que de acordo com as regras definidas, implicam uma intervenção de investigação.

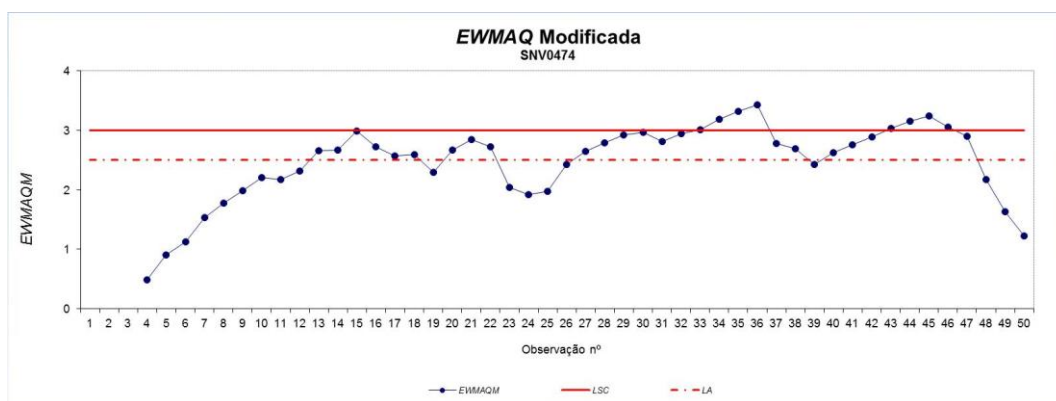


Figura 5.11 Carta *EWMAQM* para sensor SNV0474 com  $\lambda=0,25$

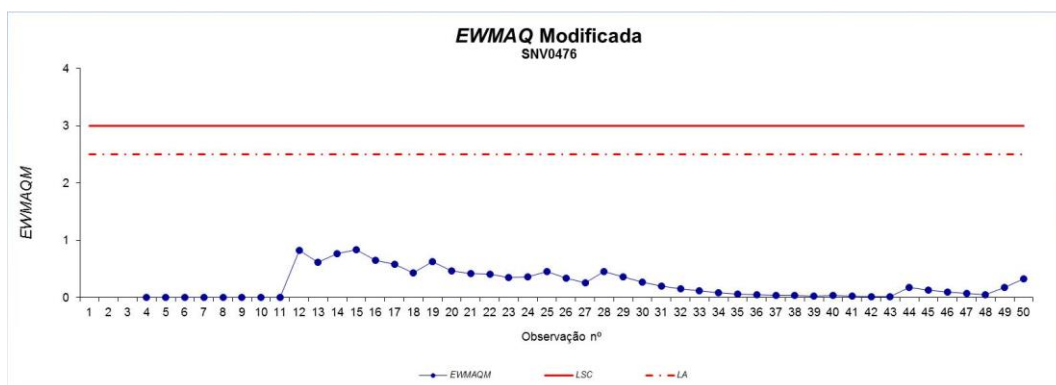


Figura 5.12 Carta *EWMAQM* para sensor SNV0476 com  $\lambda=0,25$

A aplicação das cartas *EWMAQM* para a TG1 é representada em Anexo V, e somente se representa os sensores SNV0374, porque são os únicos que revelam valores de registo, todos, contudo, dentro da normalidade.

Relativamente às cartas *EWMAQM*, poder-se-ia se perspetivar um resultado semelhante ao obtido com a *CUSUMQM*, mas tal não se verifica. Ainda que os valores usados para  $\lambda$  e  $K$  ( $\lambda=0,25$ ,  $K=3$  e  $\delta=1,5$ ) se considerem corretos, para as aplicações em processos, outros autores sugerem valores diferentes (Faraz *et al* 2011).

Considera-se que o resultado obtido para as cartas *EWMAQM*, apesar de menos sensível, é coerente com a realidade dos equipamentos e mais sensível que as *QM*.

**5.2.4 Aplicação Carta Controlo MQM a Turbinas a Gás**

Os limites a serem aplicados nas cartas de controlo *MQM* são os que resultam da fórmula:

$$T_L = (T_L)_N - 3\sigma \tag{5.1}$$

Sendo os limites calculados individualmente, obtém-se o vetor limite de funcionamento para os parâmetros a monitorizar:

$$(T_L)_j = ((T_L)_N - k\sigma)_j = \begin{bmatrix} 101,6 \\ 177,8 \\ 101,6 \\ 177,8 \end{bmatrix}$$

Para o caso da carta *MQM* aplicada à TG2 apresentam-se algumas observações acima do *LA*, mas nenhum satisfaz as regras definidas na metodologia desenvolvida para estas cartas, a saber: 5 observações acima de *LA* ou 2 acima do *LSC*.

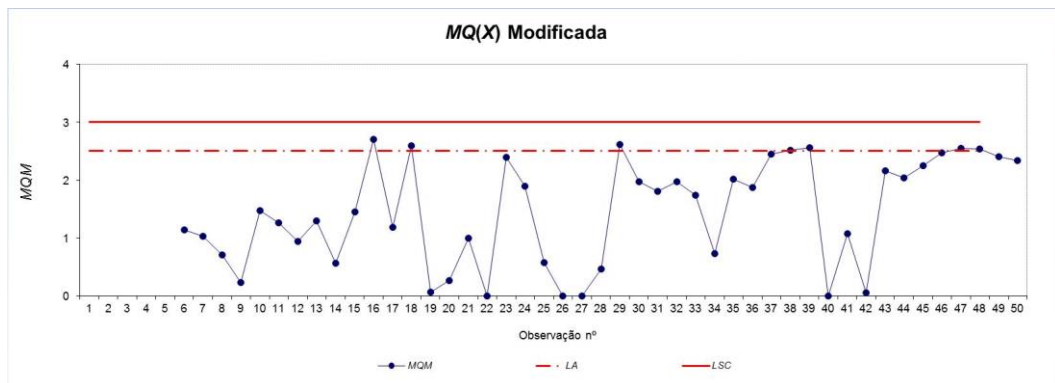


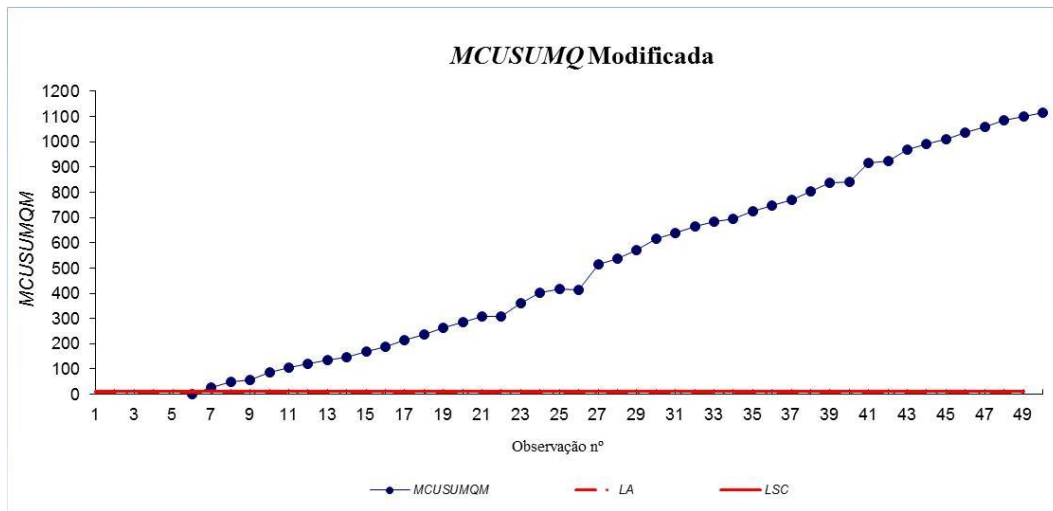
Figura 5.13 Carta *MQM* para TG2

Relativamente aos resultados obtidos para as cartas univariadas, verifica-se que na conjugação das várias variáveis para este tipo de cartas existe um amortecimento dos resultados obtidos para a carta *Q* univariada por parte das medições obtidas com os sensores que não registam valores de vibração significativos da turbina a gás. Como consequência, neste caso, deve ser dada prioridade ao estudo univariado para despistagem de eventual anomalia.

**5.2.5 Aplicação Carta Controlo MCUSUMQM a Turbinas a Gás**

As cartas multivariadas *CUSUMQM* revelam também uma sensibilidade excessiva. Mesmo variando *k*, só para valores significativamente diferentes, os resultados são ligeiramente alterados; contudo, quanto maior o valor de *k* menos sensível se torna a carta.

A carta constante na Figura 5.14 revela a necessidade de intervenção desde a observação 8.

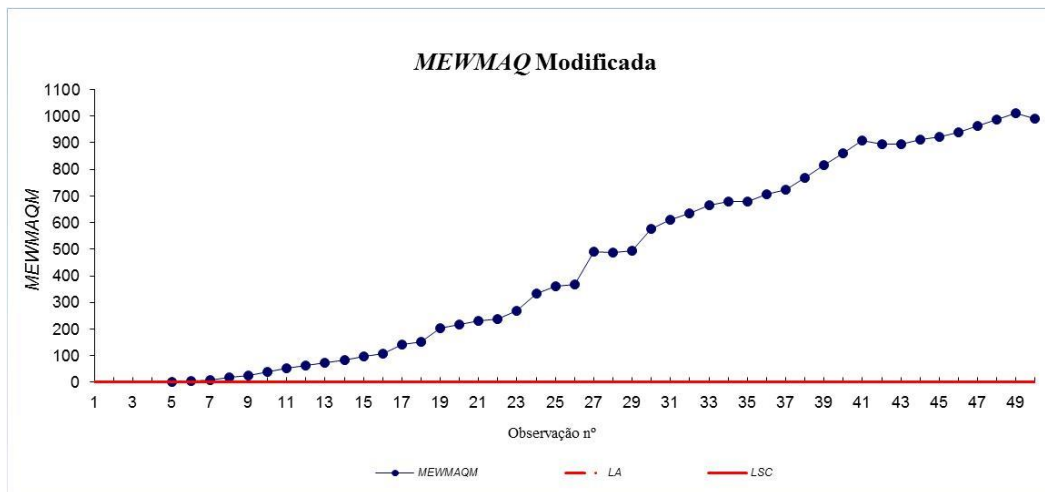
Figura 5.14 Carta *MCUSUMQM* para TG2

Para a aplicação destas cartas à TG1 os resultados foram semelhantes.

Não se recomenda atualmente a aplicação das cartas multivariadas  $Q$  pois apresentam baixa sensibilidade.

### 5.2.6 Aplicação Carta Controlo *MEWMAQM* a Turbinas a Gás

Para o caso multivariado, ambas as cartas especiais multivariadas, *MCUSUMQM* e *MEWMAQM*, revelam uma excessiva sensibilidade. Na carta *MEWMAQM* verifica-se a necessidade de intervenção desde a observação nº 7.

Figura 5.15 Carta *MEWMAQM* para TG2

Para a aplicação destas cartas à TG1 os resultados foram semelhantes.

A aplicação das cartas multivariadas  $Q$ , tanto as tradicionais como as especiais não se consideram ser atualmente, e para este tipo de equipamento, o ideal a aplicar, pois as primeiras revelam baixa sensibilidade e as segundas excesso.

### 5.3 Aplicação da Metodologia a Motores Diesel

Quando se estiver a tratar parâmetros cujos limites sejam extremos (máximos para uns, e mínimos para outros) existem implicações nas cartas controlo que devem ser consideradas. Para a carta dos mínimos (ex: pressão de óleo, pressão de água) os limites para a carta  $QM$  serão negativos (-3) e somente os resultados mínimos interessam, para a carta  $QM$  cujo parâmetro controlado têm um valor máximo permitido (ex: temperatura, nível de vibração), os limites são positivos (3).

#### 5.3.1 Aplicação Carta Controlo $QM$ a Motores Diesel

Neste capítulo, vai-se representar somente as cartas aplicadas ao Motor Diesel nº 1 (MD1) porque são as que registam resultados mais interessantes, os resultados para o Motor Diesel nº 2 (MD2) estão no Anexo V.

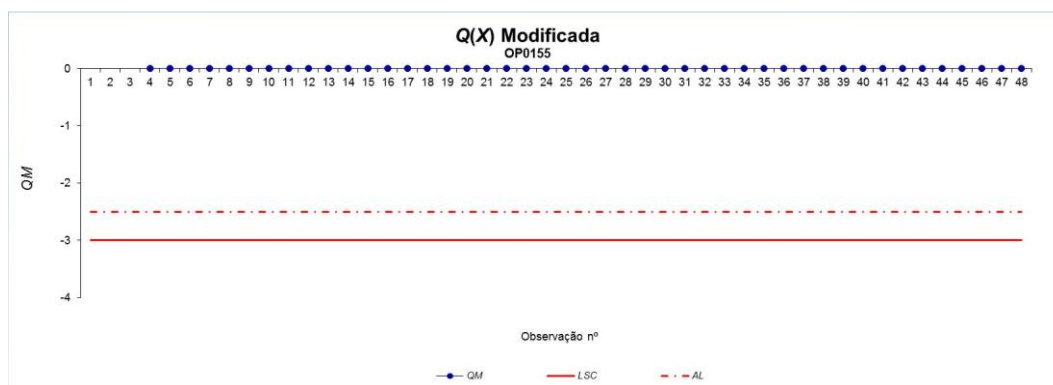


Figura 5.16 MD1 - Carta  $QM$  para sensor OP0155

Como se pode verificar na Figura 5.16, relativamente ao sensor OP0155, que corresponde à pressão de óleo de funcionamento do motor, não existe qualquer registo pelo que se considera que este parâmetro encontra-se em situação normal de funcionamento.

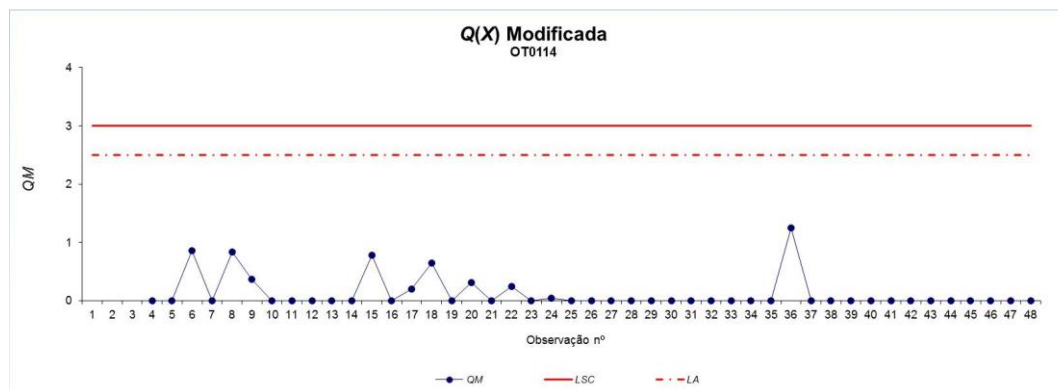
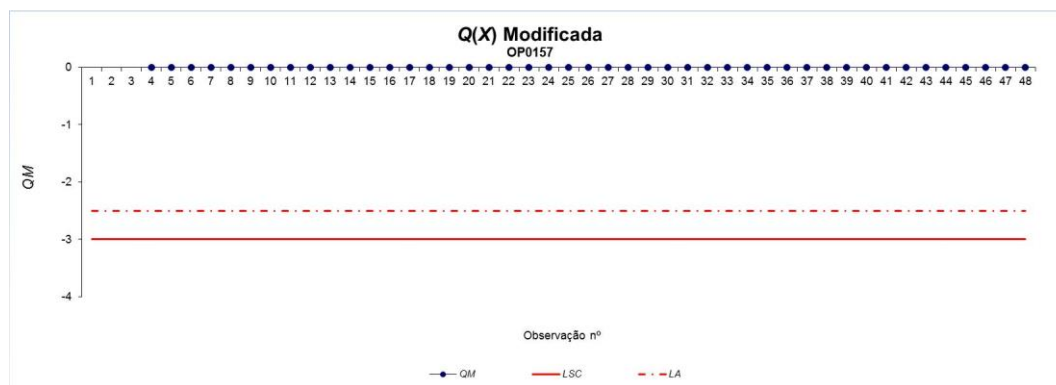
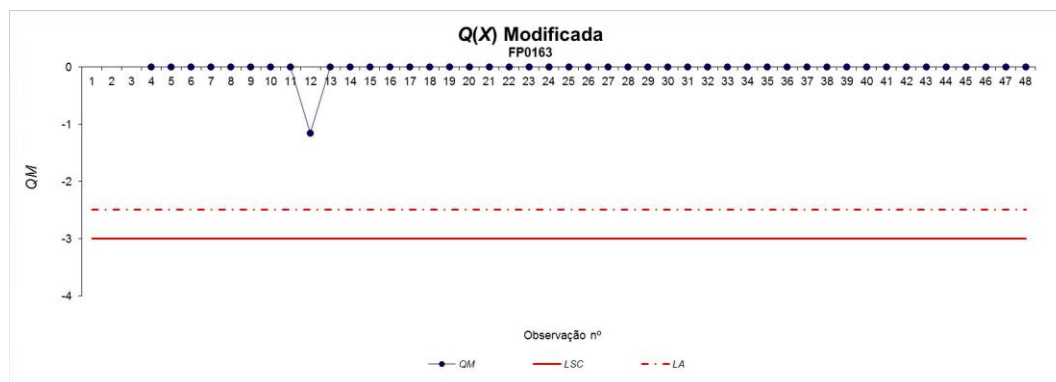


Figura 5.17 MD1 - Carta  $QM$  para sensor OT0114

Para o sensor da temperatura do óleo de funcionamento do motor, OT0114, observam-se alguns registos, mas nada de significativo, pois não atingem o limite de aviso, pelo que relativamente a este sensor o motor também se encontra sob funcionamento normal.

Figura 5.18 MD1 - Carta  $QM$  para sensor OP0157

A par da pressão de óleo de funcionamento do motor, a pressão do óleo de arrefecimento dos êmbolos também não regista valores, o que se interpreta como encontrando-se o motor dentro dos parâmetros normais de funcionamento.

Figura 5.19 MD1 - Carta  $QM$  para sensor FP0163

De acordo com o limite definido pelo fabricante e com a Figura 5.19, a pressão de combustível de funcionamento do MD encontra-se com valores normais de funcionamento.

Considera-se que existe aplicabilidade destas cartas no controlo *online* de motores *diesel*.

### 5.3.2 Aplicação Cartas Controlo $CUSUMQM$ a Motores Diesel

A Tabela 5.6 representa os valores  $k$  considerados também na definição dos limites das cartas de controlo  $CUSUMQM$  para MD.

Tal como na carta  $Q$  aplicada ao sensor OP0155 e OP0157, a carta  $CUSUMQM$  não regista qualquer valor, pelo que essas cartas não serão apresentadas. Para o caso do sensor OT0114 do MD1 pode ser consultado no Anexo V o resultado para os diversos valores de  $k=0.5$ ,  $0.75$  e  $1$ . Observando as várias cartas de controlo para os diversos valores de  $k$ , é de fato para  $K=0,25$  que existe uma sensibilidade maior. Para os restantes sensores apenas se representa as cartas em que  $k=0,25$ .

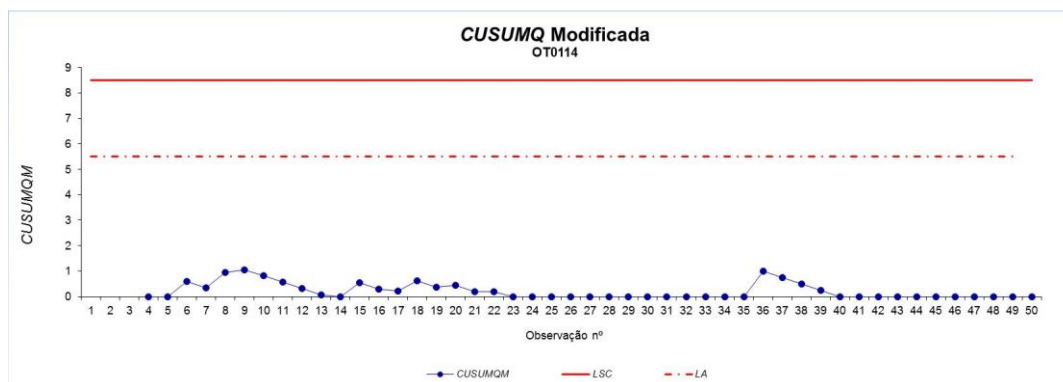


Figura 5.20 MD1 - Carta *CUSUMQM* para sensor OT0114 com  $K=0,25$

À semelhança da carta *QM*, a *CUSUMQM* aplicada a valores de OT0114 e FP0163, não regista valores significativos, são apenas mais consistentes.

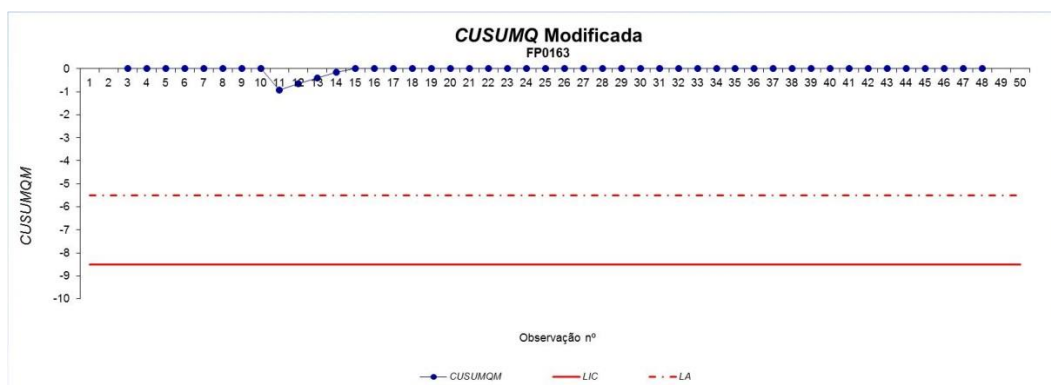


Figura 5.21 MD1 - Carta *CUSUMQM* para sensor FP0163 com  $k=0,25$

Considera-se pois que a carta *CUSUMQM*, para este tipo de parâmetros de MD possui aplicabilidade prática; no entanto, a par dos resultados obtidos e considerados nas TG, a sua aplicação deverá ser controlada de forma a não se proceder a intervenções precoces que encarecem o funcionamento e a manutenção do equipamento.

### 5.3.3 Aplicação das Cartas Controlo EWMAQM a Motores Diesel

A par das cartas *Q* e *CUSUMQM* também a carta *EWMAQM* não regista valores para os sensores OP0155 e OP0157, não sendo por isso aqui apresentadas. Aqui apresentam-se as cartas correspondentes a  $\lambda=0,25$ , por ser o valor que apresenta uma sensibilidade superior e julgada adequada. Para valores diferentes de  $\lambda$  o resultado encontra-se em Anexo V.

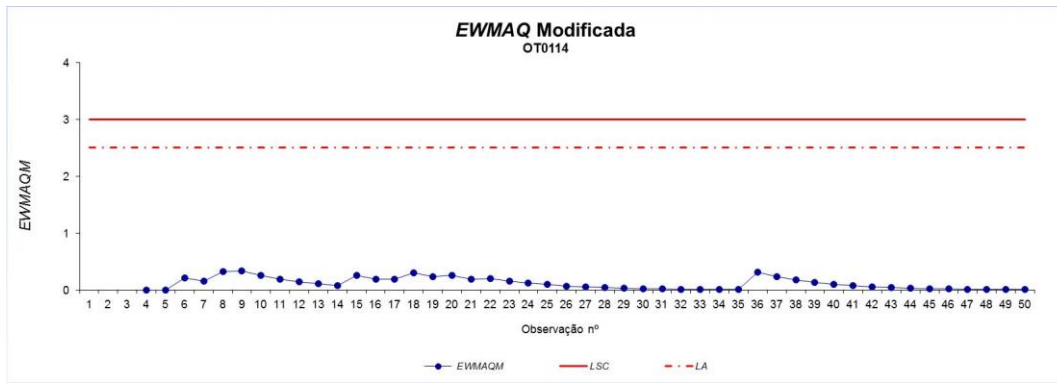


Figura 5.22 MD1 - Carta EWMAQM para sensor OT0114 com  $\lambda=0,25$

Observando as Figuras 5.22 e 5.23, resultantes da aplicação das EWMAQM aos mesmos sensores que a carta CUSUMQM verifica-se uma consistência semelhante em ambas as aplicações.

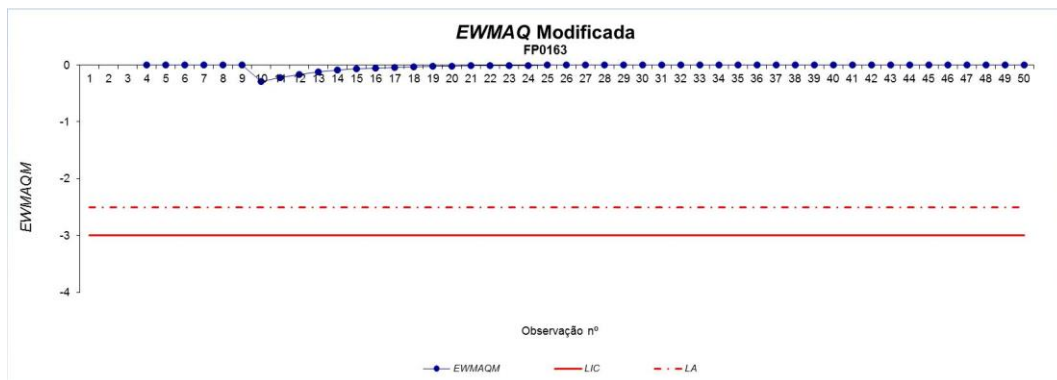


Figura 5.23 MD1 - Carta EWMAQM para sensor FP0163 com  $\lambda= 0,25$

Face aos resultados obtidos pela aplicação destas cartas aos MD e às TG, considera-se que estas devem ser utilizadas em detrimento das QM e CUSUMQM.

### 5.3.4 Aplicação Cartas Controlo MQM a Motores Diesel

Também para as cartas multivariadas se vai apresentar a aplicação das cartas MQM ao MD1.

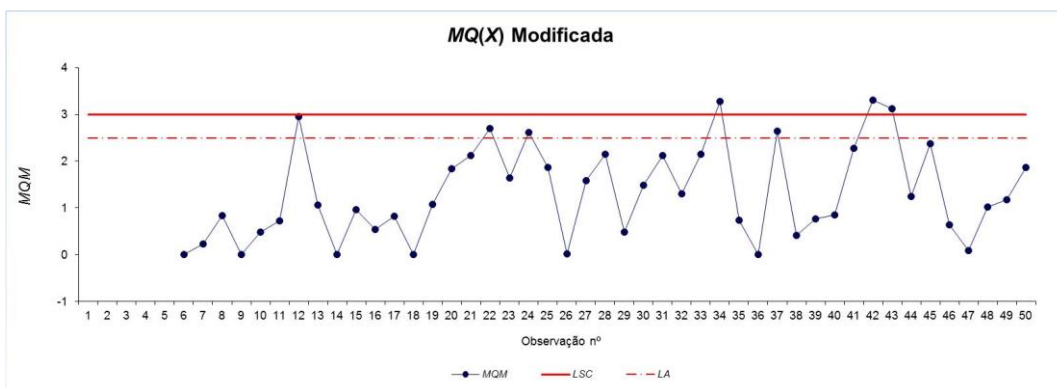


Figura 5.24 MD1 - Carta MQM

Na carta QM para o MD1, verifica-se que existe a necessidade de proceder a uma intervenção de manutenção na observação nº43; contudo, analisando os resultados obtidos nas cartas individuais,

os valores lidos individualmente, não existem indícios de anomalia, pelo que poderemos estar em presença de um falso alarme.

Na situação atual, tal como sucede com as TG, não se recomenda a aplicação destas cartas, devendo as mesmas ser alvo de mais testes no futuro.

### 5.3.5 Aplicação das Cartas Controlo *MCUSUMQM* a Motores Diesel

Na aplicação da carta *MCUSUMQM* aos motores *diesel* não é registado qualquer valor fora de controlo, o que vai de encontro à situação real do motor no momento da recolha dos dados.

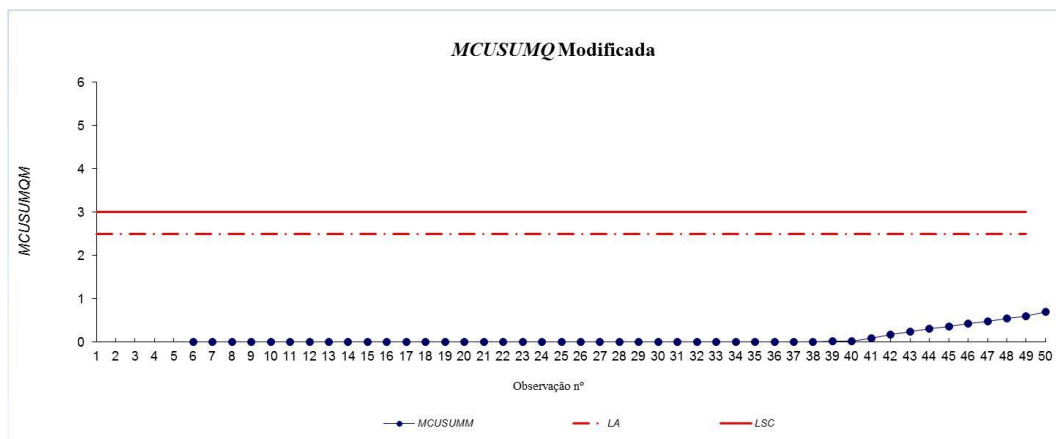


Figura 5.25 MD1 - Carta *MCUSUMQM*

Considera-se que, face aos valores recolhidos, poderá existir amortecimento dos resultados.

### 5.3.6 Aplicação das Cartas Controlo *MEWMAQM* a Motores Diesel

Os valores para construir os limites considerados nas cartas *MEWMAQM* são conforme os constantes na Tabela 4.8 do Capítulo 4.

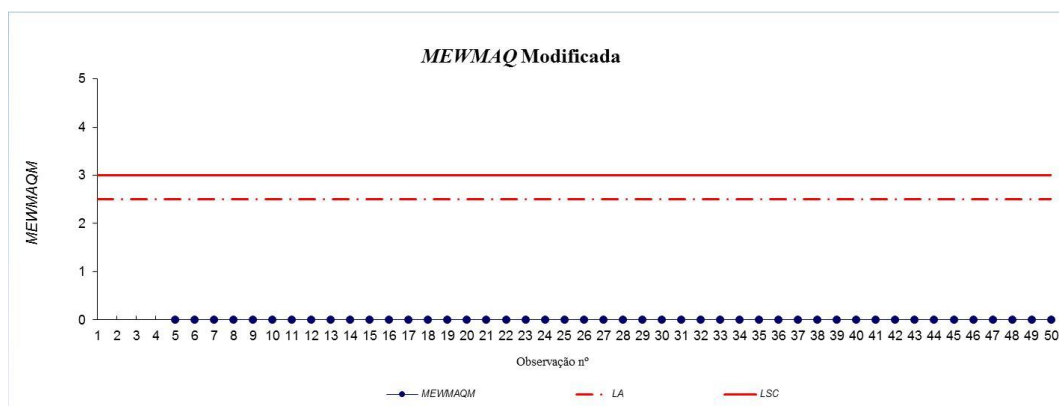


Figura 5.26 MD1 - Carta *MEWMAQM*

Dado o valor obtido para os vários sensores, a carta *MEWMAQM* quando aplicada a MD1 provoca uma amortização dos resultados, anulando-os eventualmente. Contudo, como de fato não existem

anomalias no motor, considera-se que estas cartas podem ser adequadas à monitorização *online* de MD.

#### 5.4 Aplicação das Cartas para Amostras Grandes com Simulação Dados

Considerando amostras grandes vamos demonstrar a aplicação de cartas de controlo para o caso de turbinas a gás e, para isso, serão utilizados os dados iniciais da TG1. As cartas aplicadas serão as multivariadas pois, a demonstração de aplicação da metodologia no Capítulo 4 para cartas multivariadas, provou a sua aplicabilidade e, de forma mais coerente, principalmente para as cartas *MEWMAM*. Com esta simulação de dados pretende-se provar que com a existência de poucos dados, também se consegue com um certo grau de certeza definir os parâmetros de funcionamento de um equipamento e efetuar a sua monitorização com cartas aplicáveis a amostras grandes, desde a primeira amostra, salvaguardando, alguns dados técnicos que não permitam esta situação. Sendo de referir que, mesmo nesta situação, logo que se tenha um suficiente número de dados recolhidos numa máquina, os parâmetros de funcionamento devem ser recalculados com os dados reais.

##### 5.4.1 Fase 1 – Definição dos Parâmetros de Funcionamento da TG1

Para a Fase 1 foram geradas, usando as funções de *Bootstrap* do *MATLAB* 200, amostras para os 4 pontos definidos nas turbinas a gás e já utilizados para a investigação da metodologia das cartas *short run* modificadas.

Dado que o estudo é semelhante ao efetuado para o protótipo sendo a principal diferença que os valores gerados são independentes, apenas o estudo de definição de parâmetros e confirmação de independência para um ponto serão apresentados. O ponto cujo estudo se passa a apresentar corresponde ao sensor SNV0374 da TG1.

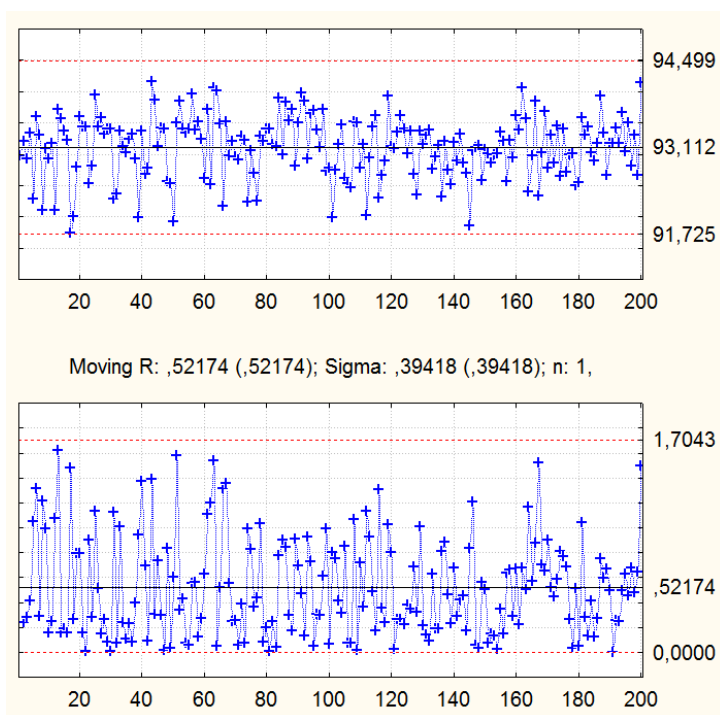


Figura 5.27 Carta de controlo X-MR

Para estimar os parâmetros de funcionamento, para eventual aplicação das cartas univariadas, aplicou-se a carta de controlo *X-MR*, Figura 5.27. Em que a média tem o valor de  $\bar{X} = 93,112$  e o desvio padrão  $\sigma = 0,46238$ .

Não será necessário efetuar a transformação dos dados, mas se desejássemos verificar a sua efetiva independência obteríamos os seguintes valores:

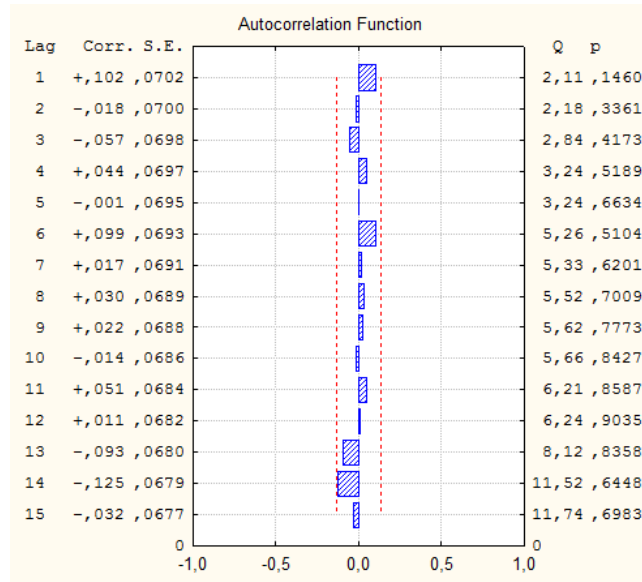


Figura 5.28 FACE dos dados

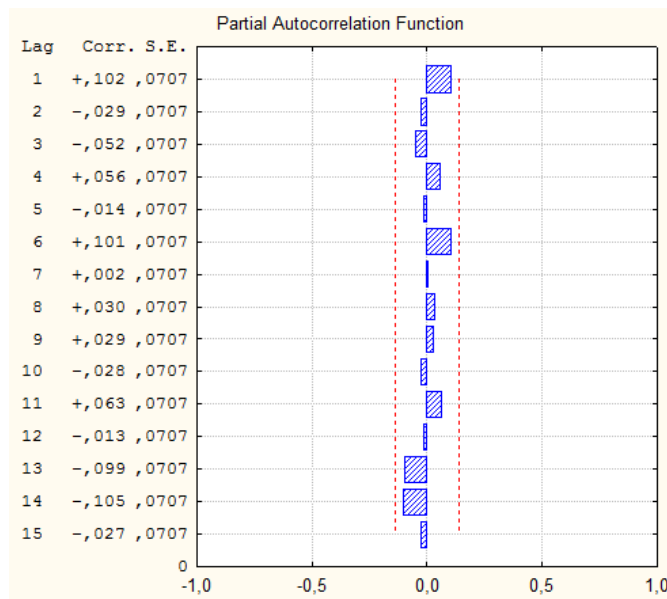


Figura 5.29 FACPE dos dados

Como se pode ver pela figura 5.29, independência dos dados parece estar garantida.

Como o tipo de monitorização que vai ser apresentado é o multivariada, vai-se estimar os parâmetros de funcionamento multivariados da TG1, com a aplicação da carta de controlo  $T^2$ .

**Cartas  $T^2$** 

Na aplicação da carta  $T^2$  para dados simulados, são considerados os mesmos sensores utilizados para os dados reais. Os limites para a carta  $T^2$  são calculados com base do definido na Tabela 3.4 do Capítulo 3.

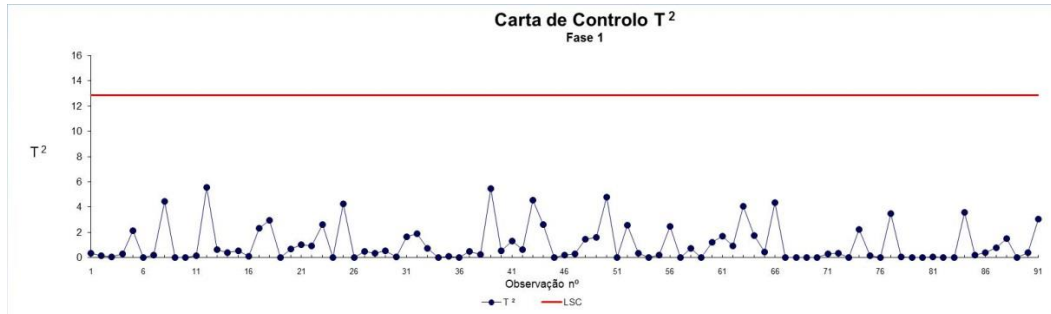


Figura 5.30 Fase 1 - Carta  $T^2$

Como todas as observações ficaram abaixo do LA, considera-se que se pode estimar os parâmetros das cartas de controle com estes dados.

O vetor média, a matriz das covariâncias e a matriz inversa das covariâncias são os seguintes:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} 93,11 \\ 93,34 \\ 90,63 \\ 73,88 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0,27225 & 0,15876 & 0,08245 & 0,20297 \\ 0,15828 & 0,51654 & 0,07243 & 0,13266 \\ 0,08245 & 0,07243 & 0,25392 & 0,31507 \\ 0,20297 & 0,13266 & 0,31507 & 0,73457 \end{bmatrix} \quad S^{-1} = \begin{bmatrix} 5,4 & -1,343 & 0,385 & -1,412 \\ -1,3429 & 2,4 & -0,3624 & 0,0979 \\ 0,3847 & -0,3624 & 8,48 & -3,678 \\ -1,412 & 0,09792 & -3,678 & 3,31 \end{bmatrix}$$

#### 5.4.2 Fase 2 – Monitorização com Cartas de Controle Multivariadas

Mantendo-se os limites  $T_L$ , do fabricante, esses valores são usados para a aplicação prática de geração de valores, à semelhança dos que foram utilizados para as cartas *short run*. Tal como na eletrobomba, os dados vão ser monitorizados desde a primeira observação. Os valores foram gerados usando a variação da média e o desvio padrão, considerando  $n=1$ , obtendo-se os seguintes resultados.

$$T_L = \begin{bmatrix} 100,035 \\ 176,606 \\ 100,739 \\ 176,448 \end{bmatrix}$$

**Cartas  $T^2$** 

Para a geração de valores aplicou-se a variação da média e do desvio padrão constante na Tabela 5.7 para o 3º e 4º agravamento, os restantes valores encontram-se em anexo V. De forma a testar a aplicabilidade para cada variação da média e do desvio padrão, foram gerados 50 valores de vibração.

Na Tabela 5.7 e no anexo V, TG – é a abreviatura de turbina a gás, o 1º algarismo identifica o nº da TG, o 2º algarismo é grau de agravamento da avaria e o 3º algarismo o nº da variável.

Tabela 5.7 Valores da média e desvio padrão que geraram valores no *MATLAB* para o 3º e 4º agravamento

	Média, $\mu$	Desvio Padrão, $\sigma$
TG131	100,610	0,5
TG132	100,840	0,5
TG133	98,130	0,5
TG134	81,380	0,5
TG141	101,110	0,5
TG142	101,340	0,5
TG143	98,630	0,5
+	81,880	0,5

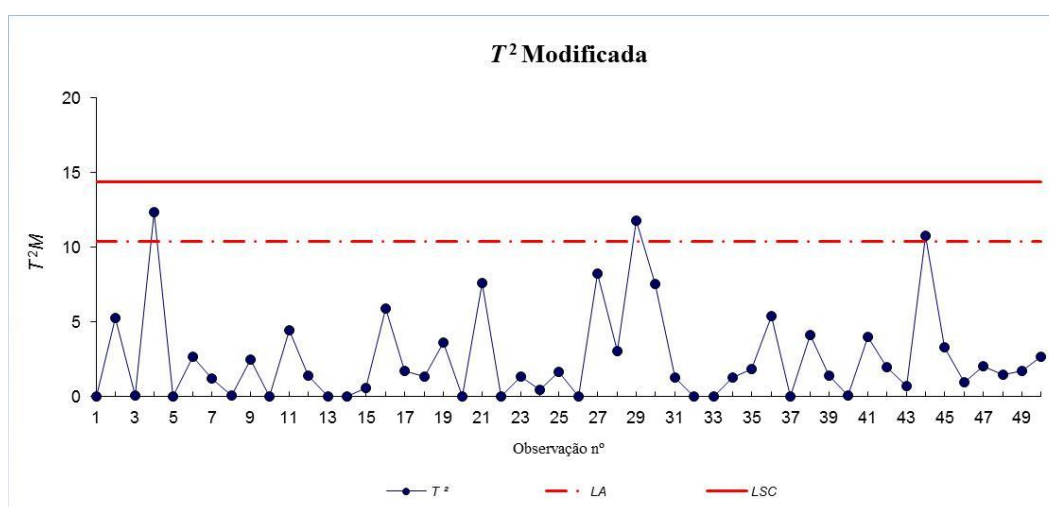


Figura 5.31 Fase 2 - Carta  $T^2$  - 3º agravamento da avaria

Relativamente aos valores registados na Figura 5.31, existem 3 observações acima do limite de aviso, não consecutivos. Como a regra de deteção para as cartas multivariadas  $T^2$  apenas considera intervenções de inspeção a partir de 8 observações acima do  $LA$ , e de manutenção a partir de 5 observações acima do  $LSC$ , não é necessário proceder a qualquer ação para além da monitorização.

Na Figura 5.32, para o 4º agravamento da avaria, embora hajam observações acima do  $LA$  e do  $LSC$  de acordo com as regras que foram definidas no Capítulo 3 não são necessárias intervenções. De qualquer forma poderia haver um ajustamento às regras para este tipo equipamentos, em que se consideravam 5 observações acima do  $LA$  para passar a um intervenção de inspeção e 2 observações acima do  $LSC$  para uma ação de manutenção.

Para as novas regras verifica-se então a necessidade de intervenção de manutenção na observação 4, sendo que, após isso, os valores alternam entre si, voltando a registar-se necessidade de intervenção de manutenção nas observações 13 e 14, na observação 18, entre a observação 23 e a observação 25 e na observação 28. Depois verifica-se a necessidade de inspeção na observação 31, e a intervenção de manutenção entre a observação 34 a 36, entre as observações 46 a 47 e por último na observação 50.

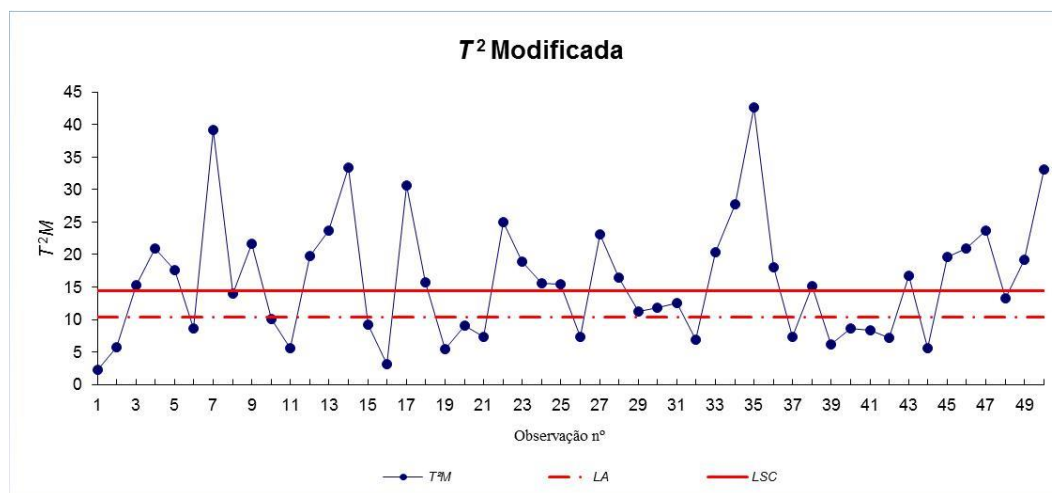


Figura 5.32 Fase 2 - Carta  $T^2$  - 4º agravamento da avaria

Face a este resultado, embora com sensibilidade inferior e com ajustamento das regras, regista-se a aplicabilidade desta carta na análise de vibração de turbinas a gás.

### Cartas MCUSUMM

Tal como no Capítulo 4 seguiu-se o sugerido por Croisier (1988), considerando  $p=4$ , e  $k=0.5$ , de forma a especificar os limites de controlo da carta  $MCUSUMM$ , definindo-se  $h_1$  como limite de alerta e  $h$  como limite superior de controlo, Tabela 4.6 do Capítulo 4.

Tabela 5.8 Limite de alerta e limite superior de controlo da carta  $MCUSUMM$  TG1

$LA$	$LSC$
$h_1$	$h$
9,46	10,9

O vetor dos limites,  $T_L$ , considerado para a carta  $MCUSUMM$  é o mesmo que da carta  $T^2$ .

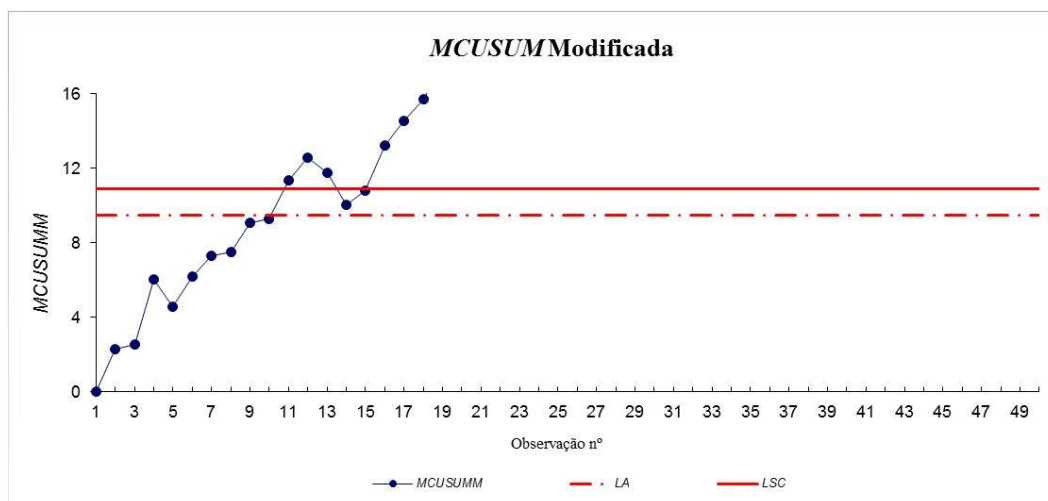


Figura 5.33 Fase 2 - Carta *CUSUMM* - 3º agravamento da avaria

Para o 3º agravamento da carta *CUSUMM* e com a alteração das regras para intervenção nas turbinas a gás para amostras grandes, verifica-se que a sensibilidade da carta é elevada a partir do início dos registos e que na observação 12 já existe necessidade de uma intervenção de manutenção. Todos os valores seguintes à observação 16 encontram-se acima do *LSC* pelo que por razão de clareza do gráfico considerou-se 16 mm o máximo de vibração representado no eixo dos *yy*.

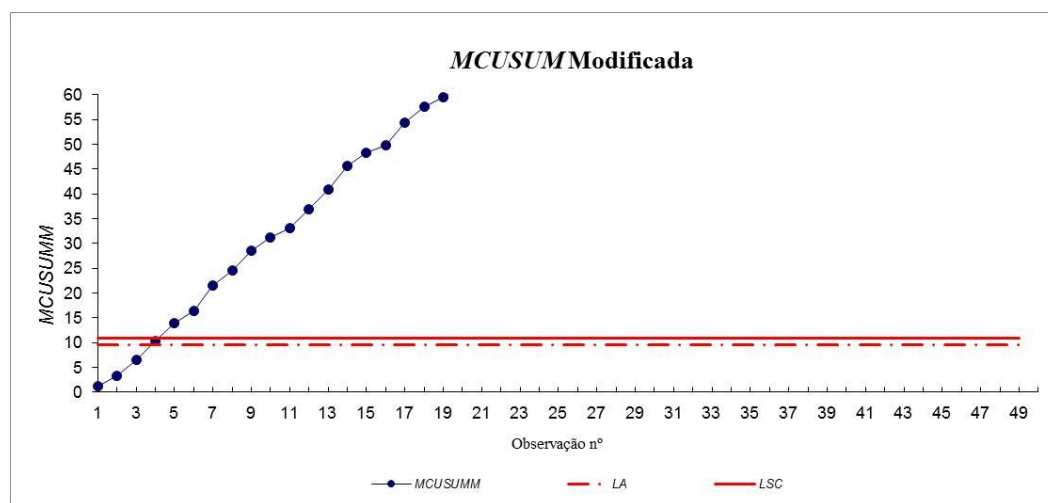


Figura 5.34 Fase 2 - Carta *CUSUMM* - 4º agravamento da avaria

Face o resultado obtido para o 3º agravamento tal como era esperado, no quarto agravamento a sensibilidade é igualmente elevada, e para as novas regras a partir da observação 6 existe necessidade de intervenção. Acredita-se que mesmo com a variação do valor de  $k$ , esta carta não será a adequada para a monitorização.

### Cartas *MEWMAM*

Tal como no caso estudo da eletrobomba, tendo  $p=4$ , e de acordo com os ábacos de Crowder (1989), os limites das cartas *MEWMAM*, são apresentados como limite de alerta  $K_f=2.5$  e como limite superior de controlo  $K=3$ .

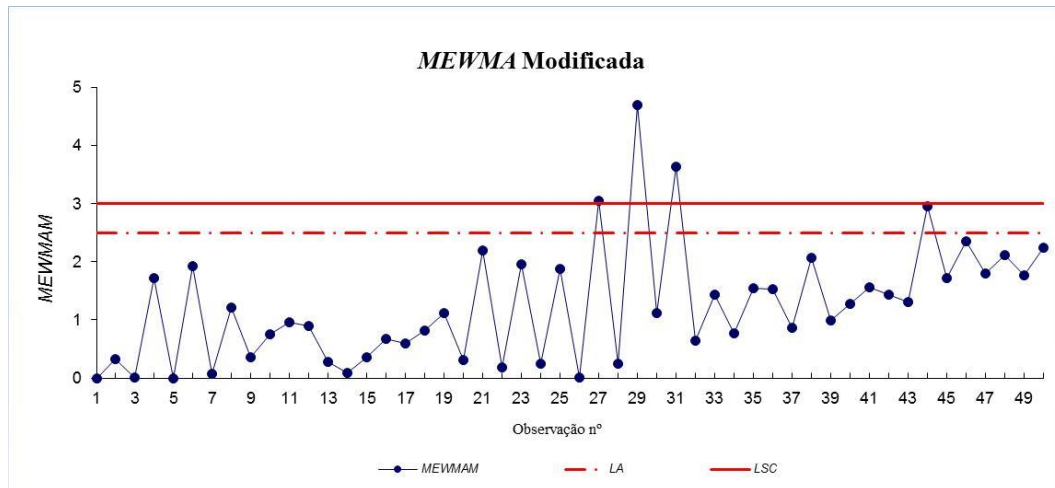


Figura 5.35 Fase 2 - Carta *MEWMAM* - 3º agravamento da avaria

Na Figura 5.35, para o 3º agravamento existem 3 observações não consecutivas acima do limite superior de controlo, pelo que não se regista a necessidade de intervenção.

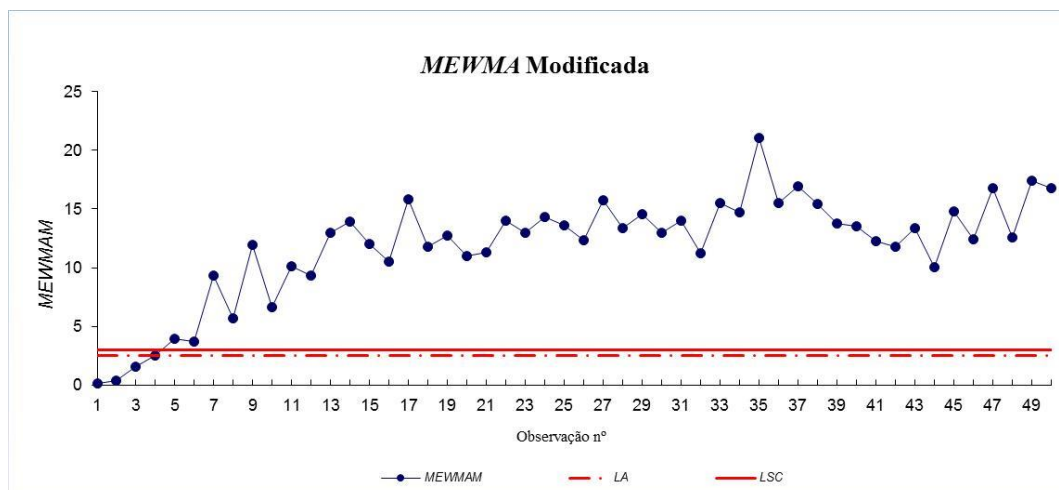


Figura 5.36 Fase 2 - Carta *MEWMAM* - 4º agravamento da avaria

Para o 4º agravamento (Figura 5.36), para as novas regras a partir da observação 6 existe necessidade de intervenção de manutenção e que todas as observações se mantêm acima do limite superior de controlo.

Face os resultados obtidos, por aplicação das cartas  $T^2M$ ,  $MCUSUMM$  e  $MEWMAM$  aos dados gerados através dos parâmetros de funcionamento da TG1, considera-se que existe aplicabilidade destas cartas a dados de vibração das turbinas a gás. No entanto, aquela que é mais adequada é a carta *MEWMAM*.

### 5.5 Considerações

No caso da monitorização *online* de parâmetros de funcionamento de equipamentos é importante definir o que medir (a quantidade ou quantidades), onde medir (os pontos ou lugares) e quando

medir (frequência de amostragem). Somente desta forma se consegue aplicar a metodologia das cartas de controlo a equipamentos de forma coerente e correta.

A anomalia detetada pelas cartas  $Q$ , na TG2, vem de encontro ao que o *SRTD*, traduzido no *SICALN*, tem registado relativamente à vibração da turbina e que esta de fato tinha uma anomalia que teve que ser equilibrada dinamicamente. Mostrou-se assim que a utilização de cartas teria, no mínimo, permitido que os operadores tivessem um melhor controlo sobre a evolução da anomalia.

Os resultados obtidos para os MD1 e MD2, considerando a aplicação de dados reais monitorizados vêm de encontro à situação real, em que os motores se encontravam aquando da sua monitorização.

Face os resultados obtidos tanto na aplicação das cartas  $QM$  a parâmetros de funcionamento das TG e de MD, considera-se estas cartas com aplicabilidade elevada na monitorização *online* do estado e evolução dos parâmetros de funcionamento destas máquinas propulsoras.

As cartas *CUSUMQM*, mesmo com a variação de  $K$ , demonstram uma sensibilidade demasiado elevada para as TG, e normal para os MD. Uma vez que este resultado não é coerente, a aplicação destas cartas não é fiável, não se recomendando a sua aplicação.

Face aos resultados obtidos pela aplicação da carta *EWMAQM* aos dados recolhidos das TG e dos MD, estas devem ser utilizadas na monitorização *online* em vez das *CUSUMQM*.

A aplicação das cartas *MQM*, *MCUSUMQM* e *MEWMAQM* revelaram alguma inconsistência de resultados. Atendendo o estado da máquina e comparando a aplicação às TG e aos MD, estas devem ser alvo de testes futuros de forma a otimizar a sua sensibilidade.

Relativamente às cartas  $T^2M$ , *MCUSUMM* e *MEWMAM*, considera-se possível a sua aplicação. No entanto, foi a carta *MEWMAM* que se demonstrou mais adequada.



---

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E INVESTIGAÇÃO FUTURA

---

*“...Enfim, há certas circunstâncias locais, e condições...que dificultam também a realização do movimento uniforme. Modo de remediar ou atenuar os inconvenientes do surgimento variado. O construtor processa forças com que as diversas...de irregularidade do movimento.”*

(Escola Naval, 1904)



## CAPÍTULO 6

### 6.1 Análise dos Resultados

### 6.2 Conclusões

### 6.3 Investigação Futura

### 6.1 Análise dos Resultados

No desenvolvimento da metodologia objeto desta tese, foi necessário testar os instrumentos desenvolvidos usando dados reais - tanto dados observacionais colhidos do funcionamento de equipamentos navais em condições reais como dados experimentais gerados em experiências devidamente planeadas e controladas pelo investigador. Na impossibilidade de obter dados reais, foi necessário, nalguns poucos casos, usar dados simulados gerados a partir dos parâmetros conhecidos de equipamentos reais.

Na criação de dados experimentais desempenhou papel fundamental um equipamento protótipo, montado nas oficinas da Escola Naval, e com o qual foi possível simular avarias “parametrizadas” em obediência a um plano de experiências satisfazendo as necessidades desta investigação, usado para testar a sensibilidade das cartas de controlo a vários fatores relevantes e a respetiva capacidade para identificar as anomalias forçadas sobre o protótipo – uma bomba de circulação fora de serviço.

No estudo que agora se apresenta, foi tida em consideração a seleção do equipamento a estudar, a definição dos parâmetros a registar e a quantidade de dados a recolher bem como toda a legislação aplicável, normas do fabricante e exigências do utilizador por forma a efetuar uma monitorização adequada e exequível.

Em particular, os limites dos parâmetros de funcionamento foram tidos em consideração, para que a monitorização seja efetuada de forma credível e fidedigna, servindo de apoio à decisão no momento de proceder a uma intervenção de investigação ou de manutenção. Especificamente, os limites dos parâmetros de funcionamento foram considerados na aplicação da metodologia, nas suas várias vertentes: univariadas, multivariadas, para amostras grandes e pequenas.

Independentemente da metodologia usada para a construção da carta, privilegiou-se a expressão gráfica como forma mais simples e intuitiva de monitorização dos dados ao longo do tempo, tendo-se concluído que, na aplicação prática da metodologia a equipamentos selecionados deve dar-se prioridade a métodos de visualização dos dados.

No estudo do protótipo, verificou-se que a carta *EWMAM* e a carta *CUSUMM*, sendo construídas sobre os mesmos dados, apresentam também uma expressão gráfica semelhante, apresentando a primeira uma sensibilidade ligeiramente inferior. É para  $\Delta=0,5\sigma$  que as cartas *CUSUMM* e *EWMAM* apresentam uma sensibilidade adequada. Considera-se que este tipo de cartas é adequado ao controlo univariado do parâmetro vibração do tipo de equipamento estudado.

Para o estudo multivariado aplicado à eletrobomba, a carta tradicional  $T^2$  não apresenta a sensibilidade adequada. Para as cartas especiais, verifica-se uma sensibilidade elevada, sendo que graficamente a carta *MCUSUMM* é mais sensível que a *MEWMAM*. Face aos resultados obtidos, considera-se que a carta *MEWMAM* tem uma performance mais razoável face aos valores de vibração registados do que as cartas univariadas. Sendo assim, recomenda-se para este tipo de equipamento a aplicação do estudo multivariado com as cartas *MEWMAM* não descurando a monitorização individual de cada variável a monitorizar.

Após a aplicação das cartas de controlo ao protótipo, foram verificados *outliers*. As cartas de controlo permitem verificar que o equipamento tem uma avaria. De forma a efetuar o diagnóstico dessa avaria, para os quatro agravamentos de avaria foi utilizada a representação gráfica espectral de frequência, de forma a poder-se definir o tipo de manutenção que o equipamento deve ser sujeito. Contudo, a análise espectral é complexa podendo suceder situações de avarias concorrentes que torna muito difícil a identificação da avaria específica e a recomendação da manutenção correspondente. Nesta situação, podem ser aplicadas técnicas complementares de controlo de condição como a termografia e a análise de óleo.

Ainda como consequência da experiência ganha com o estudo do protótipo, a decisão de proceder ou não a uma intervenção deve ser tomada com base em vários critérios, de forma a agir interventivamente na área realmente afetada, se e quando de fato se justificar. Ainda neste âmbito realizaram-se várias simulações de dados com vibrações, usando as funções do *MATLAB* tendo os resultados confirmado os obtidos e utilizados no tratamento efetuado no Capítulo 4.

Para a aplicação das cartas de controlo a máquinas propulsoras, face à quase exiguidade das amostras, foram aplicadas as cartas *short run* aos dados existentes.

Para as cartas *QM*, os resultados obtidos, tanto para as TG como para os MD, são positivos. Considera-se estas cartas com aplicabilidade elevada na monitorização *online* do estado e evolução dos parâmetros de funcionamento destas máquinas propulsoras.

Foi depois testado o desenvolvimento da metodologia das cartas *QM* para as cartas especiais *QM*, *CUSUMQM* e *EWMAQM*. Os resultados obtidos, para TG e MD, para a carta *CUSUMQM*, demonstram uma sensibilidade excessiva face à observação direta dos dados registados, o que poderia ocasionar uma intervenção antes, de fato, ser justificável esse investimento material e humano. Para as *EWMAQM*, embora se esperasse um resultado mais próximo das cartas *CUSUMQM*, tal não se registou. Considera-se que, face aos resultados, a carta *EWMAQM* deve ser utilizada em detrimento da carta *QM* e *CUSUMQM*.

O resultado da carta *EWMAQM* depende dos valores de  $\lambda$  e  $K$ . De acordo com Pereira & Requeijo (2012) e de acordo com as simulações efetuadas, consideram-se corretos os valores especificados para esses dois parâmetros.

As cartas multivariadas *QM* apresentaram baixa sensibilidade e as especiais *QM* revelam excessiva sensibilidade para o caso das TG.

A aplicação das cartas de controlo *MQM*, *MCUSUMM* e *MEWMAM* às TG e MD demonstraram um resultado pouco claro, pelo que o seu estudo deve ser alvo de mais testes e simulações nestes equipamentos e noutros, de forma a adequar a sua sensibilidade.

A simulação dos dados de vibrações das turbinas a gás, realizada em *MATLAB*, permitiu efetuar a análise da aplicabilidade das cartas multivariadas  $T^2$  na 1ª fase, e *MCUSUMM* e *MEWMAM* na 2ª fase. Da análise dos resultados, considera-se que a carta *MEWMAM* é a mais adequada, pronunciando uma boa aplicação para controlo de condição das turbinas a gás.

## 6.2 Conclusões

Relativamente às questões derivadas colocadas no Capítulo 1, conclui-se o seguinte:

Em relação à Questão Derivada 1 (QD1): pode ser afirmado que, atualmente, a manutenção planeada nos navios, é efetuada essencialmente de forma sistemática, de acordo com o Sistema de Manutenção Planeada, definido pela direção técnica da organização. Na Organização existe manutenção condicionada mas a utilização de métodos de manutenção condicionada baseada em medições de vibrações nem é feita de modo sistemático nem *online*. A manutenção não planeada ou corretiva depende da disponibilidade dos meios. Uma forma de mudar o atual modelo, será efetuar um *upgrade* ao *SICALN*, integrando a metodologia definida para monitorização *online* dos equipamentos. Para isso deve ser desenvolvida linguagem informática adequada às exigências da própria metodologia.

Em relação à Questão Derivada 2 (QD2): conclui-se que as cartas de controlo modificadas podem ser aplicadas no controlo de equipamentos de meios navais. É possível ainda utilizar a metodologia desenvolvida na monitorização *online* de equipamentos. Esta metodologia pode sofrer alterações de acordo com as características dos equipamentos e dos parâmetros a serem monitorizados.

Em relação à Questão Derivada 3 (QD3): conclui-se que para a concretização da monitorização *online* podem ser utilizados sensores fixos, e que estes fornecem dados fidedignos desde que sofram verificações ou calibrações periódicas ou sempre que seja necessário. Esta resposta foi reforçada pela verificação da aplicabilidade das cartas de controlo a dados reais de equipamentos de um navio, que correspondiam a recolhas efetuadas por sensores fixos; por exemplo, no caso da TG2 verificou-se que os resultados corresponderam à situação de avaria real que ocorreu na data da recolha dos dados.

Considera-se assim que as questões derivadas apresentadas na introdução estão respondidas, e as respetivas hipóteses formuladas encontram-se validadas para os equipamentos estudados. No entanto, este estudo deve ser alargado a outro tipo de equipamentos.

Considera-se pois, que a resposta à questão central de saber se as cartas de controlo podem ser aplicadas na monitorização de equipamentos de meios navais é afirmativa, pois a metodologia desenvolvida é flexível e de aplicação acessível aos técnicos que operam e mantêm os equipamentos navais.

A definição dos limites dos parâmetros de funcionamento varia de máquina para máquina. No caso da definição das regras para tomar decisões, apesar do número de pontos definido como limite, este deve ser revisto na aplicação a equipamentos com características diferentes das consideradas ou quando e se o equipamento for crítico para a operacionalidade de um navio ou sistema industrial.

Na definição de características a monitorizar deve-se ter em atenção o definido pelo fabricante e as exigências feitas pelo utilizador.

Na monitorização *online*, o próprio modelo desenvolvido pode ter de sofrer atualizações e upgrades. Por exemplo, no início do funcionamento de um equipamento, a única alternativa poderá ser a aplicação de cartas *QM* devido à escassez de dados; com o passar do tempo, poder-se-ão aplicar as cartas *CUSUMM* ou *EWMAM*. Em alternativa poder-se-á optar por um estudo multivariado e aplicar as cartas *QM* ou as *Q* especiais modificadas, ou ainda, existindo dados suficientes, aplicar as cartas  $T^2M$  ou *MCUSUMM* ou *MEWMAM*.

As cartas de controlo modificadas univariadas e multivariadas representam uma ferramenta importante para o controlo de condição, flexível e com adaptação aos sistemas em que estão inseridas, às exigências dos normativos, dos fabricantes e dos utilizadores.

O nível vibratório em máquinas rotativas é representativo da sua condição geral. No entanto, outros métodos complementares de diagnóstico podem e devem ser utilizados.

A utilização de sistemas *online* de monitorização portáteis ligados por *wireless* ao sistema fixo de monitorização através de sistemas sincronizados em *update* constante permitiriam, em caso de danos, que os responsáveis tomassem decisões de paragem ou intervenção antes de a anomalia ser inevitável.

Não existem publicações significativas sobre a aplicação destas cartas à monitorização do estado de condição de equipamentos. A abordagem aqui apresentada às cartas de controlo é original e considera-se que dá um importante contributo à monitorização de condição de equipamentos *online*.

Conclui-se que a metodologia desenvolvida é adequada e flexível pois pode vir a permitir a monitorização *online* de equipamentos Navais, podendo a sua aplicação ser estendida a outros sistemas terrestres e aéreos. Esta metodologia poderá eventualmente permitir a diminuição dos custos de manutenção e operação melhorando a performance dos sistemas.

### 6.3 Investigação Futura

Continuar o desenvolvimento das cartas de controlo para aplicação em equipamentos, testando a aplicabilidade da ideia de variação do peso das características de acordo com o regime do equipamento e estado, de forma a otimizar a aplicação das cartas de controlo.

Estudar a aplicação das cartas utilizando somente os valores correspondentes à velocidade máxima, tendo em conta um determinado espectro de frequências; feito isso, realizar o estudo multivariado com os valores obtidos.

Testar a aplicação de estratégias paralelas para deteção das avarias de forma a reduzir o erro de diagnóstico e consequentes riscos associados a decisões erradas, maximizando assim, significativamente, a eficácia e eficiência da manutenção, contribuindo assim para uma manutenção *Lean*.

Investigar a possibilidade de estruturar os dados de manutenção condicionada de acordo com um sistema normalizado - por exemplo de acordo com o sistema *MIMOSA Open System Architecture (OSA)* ou equivalente - e investigar a possibilidade de adaptar a base de dados do *SICALN* de forma a adaptá-lo às necessidades da monitorização. Os atuais sistemas de monitorização dos dados de alguns navios, sem tratamento estatístico (ex: *NAUTOS*), devem possuir uma ligação ao *SICALN* tornando possível a monitorização *online* integrando todos os dados referentes aos equipamentos.

Com a metodologia desenvolvida pode-se efetuar uma *RBM – Risk Based Maintenance* aliando técnicas estatísticas à análise de risco dos equipamentos, de forma a integrar essas análises de risco nos processos de decisão de gestão de manutenção.

---

---

## **BIBLIOGRAFIA**

---

---



## BIBLIOGRAFIA

- Agostinho, I. (2011). *Aplicação do Controlo Estatístico de Processo numa Indústria de Derivados de Tomate*. FCT-UNL. Monte da Caparica.
- Alfaro, E., Alfaro, J., Gamez, M., & Garcia, N. (2009). "A Boosting approach for understanding out-of-control signals in multivariate control charts", *International Journal of Production Research*, pp. 6821-6834.
- Allen, T. T. (2006). *Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma*. Springer. London.
- Al-Najjar, B., & Alsyouf, I. (2003). "Enhancing a company's profitability and competitiveness using integrated vibration-based maintenance: A case study", *European Journal of Operational Research*, pp. 643-657.
- Alt, F. B. (1985). "Multivariate quality control", in *Encyclopedia of the Statistical Sciences*, Vol. 6, pp. 110-122, S. Kotz e N. L. Johnson, Wiley, New York.
- Alves, J. V., Brito, L. C., Filho, P. C., & Brito, J. N. (2011). "Monitoramento básico da condição de funcionamento de máquinas rotativas através da "Caneta de Vibração"". *XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Metalúrgica e Industrial*, Porto Alegre: Universidade Federal de São João del-Rei.
- Alzghoul, A., & Lofstrand, M. (2011). "Increasing availability of industrial systems through data stream mining", *Computer and Industrial Engineering*, pp. 195-215.
- Arkat, J., Niaki, S. T. A. N., Abbasi, B. (2007). "Artificial neural networks in applying *MCUSUM* residuals charts for AR(1) processes", *Journal of Applied Mathematics and Computation* - Elsevier, Vol. 189, pp. 1889-1901.
- Asher, H., & Feingold, H. (1984). *Repairable Systems Reliability: Modeling and Inference, Misconception and Their Causes*. New York: Marcel Dekker.
- Assis, R. (1997). *Manutenção Centrada na Fiabilidade - Economia das Decisões*, Portugal: Lidel - Edições Técnicas.
- Barbosa, P. I. (2012). *Monitorização do Estado de Condição de Equipamentos*, Monte da Caparica: FCT-UNL.
- Bentley, J. P. (1993). *An Introduction to reliability & quality engineering*, United States of America.
- Berthold, M. R. (2012). "Parallel data mining revisited: better, not faster", *Intelligent Engineering Systems 2012*, Costa da Caparica, pp. 21.
- Blischke, W. R., & Murthy, D. N. (2003). *Case studies in reliability and maintenance*, John Wiley & Sons Inc.
- Box, G. E., & Cox, D. (1964). "An analysis of transformations", *Journal of the Royal Statistical Society*, pp. 211-246.
- Box, G. E., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (1994). *Time series analysis, forecasting and control* (3rd ed.), Prentice-Hall, New Jersey.
- Castillo, E. (2002). *Statistical Process Adjustment for Quality Control*, Series in Probability and Statistics ed.

- Castro, S. R., Costa, M. d., & Pinto, R. (1999). "Projecto "MANPRED" e estatística de avarias, manutenção por acompanhamento de condição (1ªParte)", *Manutenção*, pp. 4-12.
- Centerfield (2013). "GE LM2500", disponível em: <http://www.centerfieldinc.com> (acedido em 20 de Abril 2013).
- Chenouri, S., & Variyath, A. M. (2010). "A comparative study of phase II robust multivariate control charts for individual observations", *Quality and Reliability Engineering International*, pp. 857-865.
- Correia, F. M. (2010). *Doenças Respiratórias Crónicas - Modelo Estatístico para o Controlo Individual dos Doentes*, Universidade do Minho.
- Courrech, J., & Eshleman, R. L. (2002). *Condition Monitoring of Machinery - Harris' Shock and Vibration Handbook*. McGraw-Hill, United Sates of America.
- Crosier, R. B. (1988). "Multivariate generalizations of cumulative sum quality control schemes", *Technometrics*, pp. 291-303.
- Crowder, S. (1989). "A simple method for studying run length distributions of Exponentially Weighted Moving Average", *Technometrics*, Vol. 29, pp. 155-162.
- Crowder, S. V., & Hamilton, M. D. (1992). "An EWMA for monitoring a process standard Deviation", *Journal of Quality Technology*, Vol. 24, pp. 12-21.
- Cuignet, R. (2006). *Gestão da Manutenção*, Lidel.
- Del Castillo, E. & Montgomery, D. C. (1994). "Short-run statistical process control: *Q* chart enhancements and alternative methods", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 10, pp. 87-97.
- Dias, J. A. (2002). *Fiabilidade em Redes de Distribuição de Energia Eléctrica*, FCT-UNL, Lisboa.
- Dias, J. A., Pereira, Z. L., & Leitão, A. F. (1999). "Sistema reparáveis: modelos de fiabilidade", *Segurança, fiabilidade e análise de avarias*, Lisboa.
- Dias, J. M., Requeijo, J. G., Pereira, Z. L. (2009). "Monitorização do estado de condição dos sistemas reparáveis, riscos industriais e emergentes", Edições Salamandra, Lisboa.
- Dias, J. M., Requeijo, J. G., Puga Leal, R., & Pereira, Z. L. (2007). "Optimização do período de substituição preventiva de componentes em função dos custos", *Manutenção*, Vol. 94/95, pp. 501-512.
- Ebah (2013). "Alinhamento - acoplamentos", disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAeyPMAl/ alinhamento-acoplamentos> (acedido em 12 de Abril de 2013).
- Emerson (2013). "CSI 2130", disponível em <http://www.assetweb.com>, Emerson Process Management (acedido em 25 de Maio de 2013).
- Eshleman, R. L. (1999). "Basic machinery vibrations: an introduction to machine testing, analysis, and monitoring", *VIPress*.
- Eyvazian, M., Naini, S., & Vaghefi, A. (2008). "Monitoring process variability using exponentially weighted moving sample variance control charts", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 261-270.

- Faraz, A., Heuchenne, C., & Saniga, E. (2011). "Optimal T2 control chart with a double sampling scheme - An alternative to the MEWMA chart", *Quality and Reliability Engineering International*, pp. 751-760.
- Faraz, A., Heuchenne, C., Saniga, E., & Foster, E. (2013), "Monitoring delivery chains using multivariate control charts", *European Journal of Operational Research*, pp. 282-289.
- Feigenbaum, A. V. (1983). *Total Quality Control*, McGraw-Hill.
- Filho, A. A. (2005). *Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE - Análise Dinâmica*, First ed, Brasil.
- Fonseca, J. (2001). *Estatística Matemática*, Vol. 2, Edições Sílabo, Lisboa.
- Gama, P. (2001). *Ferramentas da Qualidade - IPQ-Fichas Técnicas*, Associação Portuguesa para a Qualidade, Portugal.
- Gan, F. F. (1991). "An optimal design of CUSUM quality control charts", *Journal of Quality Technology*, Vol. 23, pp. 279-286.
- Guimarães, R. C., & Cabral, J. A. (2010). *Estatística* (Revista ed.), Verlag Dashöfer, Portugal.
- Hameed, Z., Ahn, S., & Cho, Y. (2009). "Practical aspects of a condition monitoring system for a wind turbine with emphasis on its design, system architecture, testing and installation", *Renewable Energy*, pp. 879-894.
- Harris, C. M., & Piersol, A. G. (2002). *Harris's Shock and Vibration Handbook Fifth Edition*, United States of America.
- Hawkins, D. M. (1991). "Multivariate quality control based on regression-adjusted variables", *Technometrics*, Vol. 33, pp. 61-75.
- Hayter, A., & Tsui, K. (s.d.). "Identification and quantification in multivariate quality control problems", *Journal of Quality Technology*, Vol. 26, pp. 197-208.
- Institute, M. (2005). *Analista de Vibrações - Categoria II - Manual do Curso Técnico*. SPECMAN.
- ISO (2003). *ISO 2372:2003-Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200 rev/sec - basis for specifying evaluation standards*, International Standards Organization, Switzerland.
- ISO (1991). *ISO8258:1991 - Regras - Definição das Causas Especiais de Variação*, International Standards Organization, Switzerland.
- ISO (2003). *ISO-13374- Condition Monitoring and Diagnostics of Machines - Data processing, Communication and Presentation*, International Standards Organization, Switzerland.
- ISO. (2002). *ISO13380:2002 - Condition Monitoring and Diagnostics of Machines – General guidelines on using performance parameters*, International Standards Organization, Switzerland.
- ISO (2008). *ISO9001 - Quality Management Systems - Requirements*, International Standards Organization, Switzerland.

- Issam, B. K., Mohamed, L. (2008). "Support vector regression based residual *MCUSUM* control chart for autocorrelated process". *Journal of Applied Mathematics and Computation-Elsevier*, pp. 565-574.
- Jardine, A. K., Banjevic, D., & Makis, V. (1997). "Optimal replacement policy and the structure of software for condition-based maintenance", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, pp. 109-119.
- Jackson, J. E. (1980a). "Principal components and factor analysis: Part I - principal components", *Journal Quality Technology*, Vol. 12, pp. 201-213.
- Jackson, J. E. (1981b). "Principal components and factor analysis: Part II - Additional Topics Related to Principal Components", *Journal of Quality Technology*, Vol. 13, pp. 46-58.
- Jackson, J. E. (1981c). "Principal components and factor analysis: Part III - What is the Factor Analysis". *Journal of Quality Technology*, Vol. 13, pp. 125-130.
- Juran, J. M., & Junior, F. G. (1970). *Quality Planning and Analysis*, New York.
- Juran, J. M., Junior, F. M., & Junior, R. S. (1974). *Quality Control Handbook*, United states of America.
- Justino, V. S. (2009). *Implementação de um Programa de Fiabilidade na Frota de uma Companhia aérea*, Lisboa: FCT-UNL.
- Lampreia, S. (2005). *Fiabilidade e Manutibilidade de Navios de Pequena e Média Dimensão*, FCT-UNL, Monte da Caparica - Almada.
- Lampreia, S., & Parreira, R. (2011). "Manutenção lean com Aplicação técnicas qualidade na análise preditiva de fiabilidade". *Manutenção, 3º e 4º trimestre*, nº110-111, pp. 58-60.
- Lampreia, S., Requeijo, J., Dias, J., & Vairinhos, V. (2012a). "T<sup>2</sup> Charts applied to mechanical equipment condition control". *16th Intelligent Engineering Systems 2012-INES2012*,. Costa Caparica, pp. 441-446.
- Lampreia, S., Barbosa, P., & Requeijo, J. (2012b). "Manutenção condicionada baseada na aplicação de cartas controlo *EWMA*", *Congresso Ibérico de Jovens Engenheiros - CIJE2012*, Braga.
- Lampreia, S., & Requeijo, J. (2012c). "Analysis of an equipment condition by Q & multivariate Q control charts". In A. J. Viamonte (Ed.), *Mathematical Methods, Computational Techniques and Intelligent Systems*. Porto: Edition Mathematics and Computers in Science and Engineering Series, pp. 200-205.
- Lampreia, S., Requeijo, J., Dias, J., & Vairinhos, V. (2012d). "Acompanhamento de condição de motores diesel marítimos baseados em cartas de controlo *Q*, *CUSUMQ*, *EWMAQ* e *MQ*", *O Propulsor*, pp. 29-39.
- Lampreia, S., Dias, J., Requeijo, J., & Vairinhos, J. (2013). Vibrations detection and analysis in equipments with *MCUSUM* charts and frequencies graphs. In J. F. Gomes, & S. A. Meguid (Ed.), *Recent Advances in Integrity-Reliability-Failure*. Maia: INEGI, pp. 93-94.
- Lampreia, S., Requeijo, J., Dias, J., & Vairinhos, V. (2013). "Equipment condition monitoring with an application of *MEWMA* control charts and others charts". Setembro de 2013. *11th International Conference on Vibration Problems*. Lisboa: Zuzana Dimitrovová; João Rocha Almeida; Rodrigo Gonçalves, pp. 191.

- Ledolter, J., & Burril, C. (1999). *Statistical Quality Control - Strategies and Tools for Continual Improvement*, USA.
- Leite, A. D. (1998). "As modernas filosofias de manutenção no limiar do novo milénio", *Manutenção*.
- Lowry, C. A., & Montgomery, D. C. (1995). "A Review of multivariate control charts", *IIE Transactions*, Vol. 27, pp. 800-810.
- Marinha-DN (1984). *ILMANT 512 - Manual do Sistema de Recolha e Tratamentos de Dados*. Direção de Navios, Alfeite-Almada.
- Marinha-DN (1998). *ILDINAV 802 - Manual do Sistema da Manutenção e do Sub-Sistema de Manutenção Planeada*. Direção de Navios, Alfeite: Marinha.
- Marinha-DN (1998a). "Projeto MANPRED", Direção de Navios, Alfeite-Almada, Setúbal, Portugal.
- Marinha-EMA (1997). *ILA 5(A) - Instruções para a Organização da Manutenção das Unidades Navais e Outros Meios de Acção Naval*, Marinha, Lisboa.
- Marinha-EN (1904). *Lições de Machinas Maritima*, Lisboa: Escola Naval.
- Marinha-ETNA (2010a). *Turbinas a Gás*, Marinha-ETNA, Alfeite.
- Marinha-ETNA (2010b). *Motores diesel propulsores*, Marinha-ETNA, Alfeite.
- Maroco, J. (2003). *Análise Estatística - Com Utilização do SPSS*, Lisboa: Edições Sílabo.
- Mason, R. L., Tracy, N. D., & Young, J. C. (1997). "A practical approach for interpreting multivariate T<sup>2</sup> control charts signals". *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, pp. 396-406.
- Mechefske, C. K. (2005). "Machine condition monitoring and fault diagnostics", *Vibration and Shock Handbook*, Clarence Silva, Taylor & Francis, United States of America.
- Meirovitch, L. (1975). *Elements of Vibration Analysis*, International Student Edition ed.
- MIL (2005). *MIL-STD-167-1A - Mechanical Vibrations of Shipboard Equipment, Department of Defense Test Method Standard*, United States of America.
- Montgomery, D. C., Johnson, L. A., & Gardiner, J. S. (1990). *Forecasting & Time Series Analysis* (2nd ed.), McGraw-Hill, Singapore.
- Montgomery, D. C. (2012). *Introduction to Statistical Quality Control*, John Wiley & Sons Inc, USA
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (3rd ed.), John Wiley & Sons, USA.
- Mota, P. J. (2009). *Análise de Vibrações Aplicada à Manutenção Condicionada*, Alfeite-Almada: Escola Naval.
- MTU (2013), "MTU 1163TB83", disponível em <http://www.mtu-online.com> (acedido em 19 de Março de 2013).
- Murteira, b. J. (1993). *Análise Exploratória dos Dados*, Lisboa: McGraw-Hill.

- Nedumaran, G., & Pignatiello, J. (1998). "Diagnosing signals from  $T^2$  and  $X$  multivariate control charts", *Quality Engineering*, Vol. 10(4), pp. 657-667.
- Nepomuceno, L. X. (1985). *Manutenção Preditiva em Instalações Industriais - Procedimentos Técnicos*, Edgard Blucher Ltda.
- NP (2007). *EN13306 - Terminologia da Manutenção*, Caparica: IPQ.
- O'Connor, P. D., & Kleyner, A. (2011). *Practical Reliability Engineering, Fifth Edition*, John Wiley & Sons.
- Ott, E. R., Schilling, E. G., Neubauer, & V., D. (2005). *Process Quality Control: Troubleshooting and Interpretation of Data* (4th ed.), McGraw-Hill, United States of America.
- Palma, L. M. (2006). *Fault Detection, Diagnosis and Fault Tolerance Approaches in Dynamic Systems Based on Black-Box Models*, FCT-UNL, Monte da Caparica.
- Parnell, G. S., Driscoll, P. J., & L., H. D. (2008). *Decision Making in Systems Engineering and Management*, New Jersey - United States of America.
- Parreira, R. M. (2009). *Análise de Dados de Vibração - Contributo para definição do estado de condição*, ISEGI-UNL, Lisboa.
- Pereira, F. J. (1996). *Modelos de Fiabilidade em Equipamentos Críticos*, Porto: FEUP.
- Pereira, F. J., & Canuto, R. (2010). "Improvement of the operational reliability in a line of production of pulp to paper", *Universitatea Petrol*, Romania.
- Pereira, F. J., & Sena, F. (2012). *Fiabilidade e a sua aplicação à manutenção*, Publindústria, Porto.
- Pereira, P. J. (2011). *Análise de Vibrações dos Geradores do N.R.P. "Bérrio", no Âmbito da Manutenção Condicionada*, Escola Naval, Alfeite-Almada.
- 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.
- Perry, M. B., & Pignatiello, J. J. (2011). "Estimating the time of step change with Poisson *CUSUM* and *EWMA* control charts", *International Journal of Production Research*, Vol. 49-10, pp. 2857-2871.
- Preditech (2012), "Desalinhamentos angular e paralelo", disponível em <http://www.preditech.com.br/Itemid=75.htm> (acedido em 19 de Agosto de 2012).
- Qingfeg, W., Wenbin, L., Xin, Z., Jianfeng, Y., & Qingbin, Y. (2011). "Development and application of equipment maintenance and safety integrity management system", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 321-332.
- Quesenberry, C. (1996). "Response to short-run statistical process control", *Quality and Reability Engineering International*, Vol. 12, pp. 159-161.
- 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.

- Requeijo, J., Lampreia, S., Barbosa, P., & Dias, J. (2012). "Controlo de condição de equipamentos mecânicos por análise de vibrações com dados autocorrelacionados", *Riscos, Segurança e Fiabilidade*, Salamandra, Lisboa, Vol. 1, pp. 483-497.
- Roque, António Afonso (2002). "Equilibragem dinâmica no local", Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Runger, G. C., Alt, F. B., & Montgomery, D. C. (1996). "Contributors to a multivariate statistical process control", *Communications in Statistics - Theory and Methods*, Vol. 25, pp. 2203-2213.
- Sampaio, C. (1999). "Curso de manutenção por controlo de condição", *Manutenção*, pp. 23-31.
- Saniga, E. (1991). "Joint statistical design of  $\bar{X}$  and R control charts", *Journal of Quality Technology*, pp. 156-162.
- Santos, J. P. (2011). *Análise de fiabilidade de sistemas e componentes de helicópteros*, ISEL, Lisboa.
- Sciencedirect (2013). "Elipse de controlo", disponível em: <http://www.sciencedirect.com> (acedido em 16 de Maio 2013).
- Sena, F. M. (2013). "Enquadramento da análise de óleos e dos líquidos penetrantes no contexto da manutenção condicionada", *O Propulsor*, pp. 32-39.
- Serel, D. A., & Moskowitz, H. (2008). "Joint economic design of EWMA control charts for mean and variance", *European Journal of Operational Research*, pp. 157-168.
- Senouci, K., Bendaoud, A., Tilmatine, A., Medles, K., Das, S., & Dascalescu, L. (2009). "Multivariate statistical process control of electrostatic separation processes". *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1079-1085.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). "An analysis of variance test for normality (Complete samples)". *Biometrika*, 52, pp. 591-611.
- Sibanda, T., & Sibanda, N. (2007). "The CUSUM Chart Method as a tool for continuous monitoring of clinical outcomes using routinely collected data", *Bmc Medical Research Methodology*.
- Simeón, E. J. (2008). *Aplicação de técnicas de inteligência artificial no desenvolvimento de um sistema de manutenção baseada em condição*. Brasília: FT-DEM-Universidade de Brasília.
- Smith, A. M. (1993). *Reliability - Centered Maintenance*, United States of America: McGraw-Hill.
- Snoussi, A. (2005). "On SPC for short run autocorrelated data", *Marcel Dekker Inc*.
- Snoussi, A., Ghourabi, M., & Limam, M. (2006). *On SPC for Short Run Autocorrelated Data*, Taylor & Francis, England.
- Sobral, J., & Ferreira, L. (2007). "A importância da fiabilidade dos equipamentos de proteção contra incêndio na gestão do risco industrial". *II Encontro Nacional de Riscos, Segurança e Fiabilidade*, Lisboa, pp. 447-466.

- Sobral, J. A. (2010). *Utilização da Metodologia "RAMS" na Análise de Barreiras de Segurança de Instalações Industriais de Risco Elevado*, FEUP, Porto.
- Soler & Palau (2012). "Desalinhamento comum", disponível em [http://www.solerpalau.pt/formacion\\_01\\_19.html](http://www.solerpalau.pt/formacion_01_19.html), (acedido em 11 de Agosto de 2013).
- Solomon, S. (1999). *Sensors Handbook*, United States of America: McGraw-Hill.
- Tadikamalla, P., & Popescu, D. (2007). "Kurtosis correction method for X and R control charts for long-tailed symmetrical distributions", *Naval Research Logistics*, pp. 371-383.
- Tsang, A. H., & Chan, P. (2000). TPM Implementation in China: a Case Study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, pp. 144-157.
- Vachtsevanos, G., Lewis, F. L., Roemer, M., Hess, A., & Wu, B. (2006). *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*. United States of America.
- Vanneste, S., & Wassenhove, L. V. (1995). "An integrated and structured approach to improve maintenance". *European Journal of Operational Research*, pp. 241-257.
- Varinhos, V. M. (2003). *Desarrollo de un Sistema para Minería de Datos Basado en los Métodos Biplot*. Universidade de Salamanca, Salamanca.
- VDI (1982). DII 2059 - *Shaft vibrations of hydraulic machine sets - Measurement and evaluation Part5*, VDI-Richtlinien, Germany.
- Villalobos, J. R., Munoz, L., & Gutierrez, M. A. (2005). "Using fixed and adaptative multivariate SPC charts for online SMD assembly monitoring", *International Journal of Production Economics*, pp. 109-121.
- Villardón, M. P. (2010). "Biplot: 40 anos de história". *The 5th Scientific Meeting ISLA - Data Mining and Business Intelligence Methods and Applications*, ISLA, Santarém, pp. 12-15.
- Walter, B. (2006). Disponível em <http://www.mimosa.org> (acedido em 24 de Março de 2013).
- Wheeler, D. J. (1995). *Advanced Topics in Statistical Process Control, SPC*, Press, Knoxville, Tennessee.
- Wise, S. A., & Fair, D. C. (1998). *Innovative Control Charting - Practical SPC Solutions for Today's Manufacturing Environment*, United States of America: American Society for Quality.
- Yile, L. u., Xuehang, X., & Lei, Z. (2008). "Lean Maintenance Framework and its Application in Clutch Maintenance". *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, IEEE Computer Society, pp. 230-232.
- Youree, R., Yalowitz, J., Corder, A., & Ooi, T. (2008). "A multivariate statistical analysis technique for on-line fault prediction", *Prognostics and Health Management*, Denver, CO.
- Zhang, G., & Chang, S. I. (2008). "Multivariate EWMA control charts using individual observations for process mean and variance monitoring and diagnosis". *International Journal of Production Research*, Vol. 46-24, pp. 6855-6881.
- Zou, C., & Tsung, F. (2010). "Likelihood ratio-based distribution-free EWMA control charts". *Journal of Quality Technology*, pp. 174-196.

# **ANEXO I**

## **FATORES PARA CONSTRUÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO DE VARIÁVEIS**



Tabela I. 1 Fatores para construção das cartas de controle de variáveis (Fonte de: Pereira e Requeijo, 2012)

Dimensão Amostra	carta de médias			cartas de desvios padrão						cartas de amplitudes				
	fatores limites controle			fatores linha central		fatores limites controle				fatores limites controle				
	n	A	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	d <sub>2</sub>	c <sub>4</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	d <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
2	2,121	1,881	2,659	1,128	0,7979	0	3,267	0	2,606	0,853	0	3,686	0	3,267
3	1,732	1,023	1,954	1,693	0,8862	0	2,568	0	2,276	0,888	0	4,358	0	2,575
4	1,500	0,729	1,628	2,059	0,9213	0	2,266	0	2,088	0,880	0	4,698	0	2,282
5	1,342	0,577	1,427	2,326	0,9400	0	2,089	0	1,964	0,864	0	4,918	0	2,115
6	1,225	0,483	1,287	2,534	0,9515	0,030	1,970	0,029	1,874	0,848	0	5,078	0	2,004
7	1,134	0,419	1,182	2,704	0,9594	0,118	1,882	0,113	1,806	0,833	0,204	5,204	0,076	1,924
8	1,061	0,373	1,099	2,847	0,9650	0,185	1,815	0,179	1,751	0,820	0,388	5,306	0,136	1,864
9	1,000	0,337	1,032	2,970	0,9693	0,239	1,761	0,232	1,707	0,808	0,547	5,393	0,184	1,816
10	0,949	0,308	0,975	3,078	0,9727	0,284	1,716	0,276	1,669	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777
11	0,905	0,285	0,927	3,173	0,9754	0,321	1,679	0,313	1,637	0,787	0,811	5,535	0,256	1,744
12	0,866	0,266	0,886	3,258	0,9776	0,354	1,646	0,346	1,610	0,778	0,922	5,594	0,283	1,717
13	0,832	0,249	0,850	3,336	0,9794	0,382	1,618	0,374	1,585	0,770	1,025	5,647	0,307	1,693
14	0,802	0,235	0,817	3,407	0,9810	0,406	1,594	0,399	1,563	0,763	1,118	5,696	0,328	1,672
15	0,775	0,223	0,789	3,472	0,9823	0,428	1,572	0,421	1,544	0,756	1,203	5,741	0,347	1,653
16	0,750	0,212	0,763	3,532	0,9835	0,448	1,552	0,440	1,526	0,750	1,282	5,782	0,363	1,637
17	0,728	0,203	0,739	3,588	0,9845	0,466	1,534	0,458	1,511	0,744	1,356	5,820	0,378	1,622
18	0,707	0,194	0,718	3,640	0,9854	0,482	1,518	0,475	1,496	0,739	1,424	5,856	0,391	1,608
19	0,688	0,187	0,698	3,689	0,9862	0,497	1,503	0,490	1,483	0,734	1,487	5,891	0,403	1,597
20	0,671	0,180	0,680	3,735	0,9869	0,510	1,490	0,504	1,470	0,729	1,549	5,921	0,415	1,585
21	0,655	0,173	0,663	3,778	0,9876	0,523	1,477	0,516	1,459	0,724	1,605	5,951	0,425	1,575
22	0,640	0,167	0,647	3,819	0,9882	0,534	1,466	0,528	1,448	0,720	1,659	5,979	0,434	1,566
23	0,626	0,162	0,633	3,858	0,9887	0,545	1,455	0,539	1,438	0,716	1,710	6,006	0,443	1,557
24	0,612	0,157	0,619	3,895	0,9892	0,555	1,445	0,549	1,429	0,712	1,759	6,031	0,451	1,548
25	0,600	0,153	0,606	3,931	0,9896	0,565	1,435	0,559	1,420	0,708	1,806	6,056	0,459	1,541



## **ANEXO II**

### **ÁBACOS**



### II.1 Ábacos para as cartas CUSUM e CUSUM-FIR

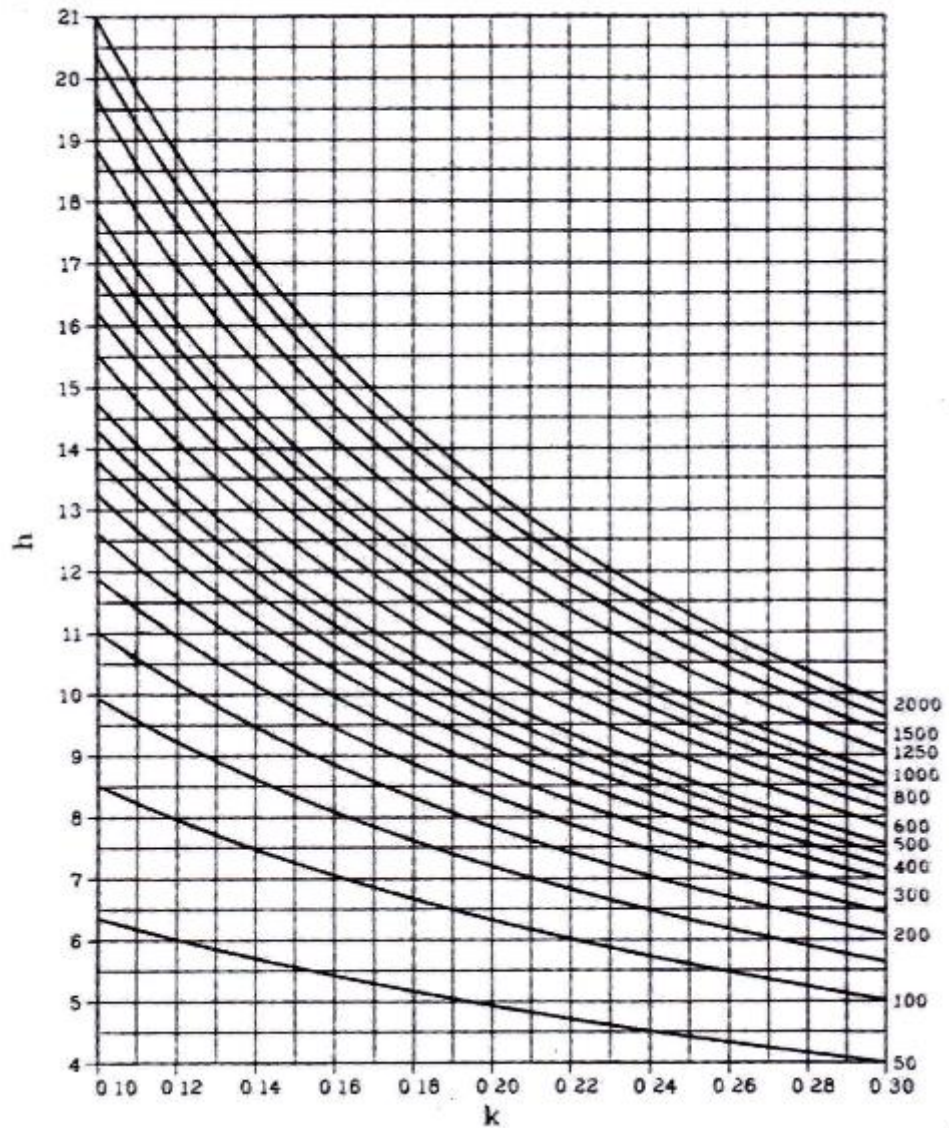


Figura II.1 Combinação de  $k$  e  $h$  da carta CUSUM, com  $C_0 = 0$  e  $T_0 = 0$ , para vários valores de  $ARL_{EmControlo}$  (Fonte de: (Gan, 1991) (Pereira & Requeijo, 2012))

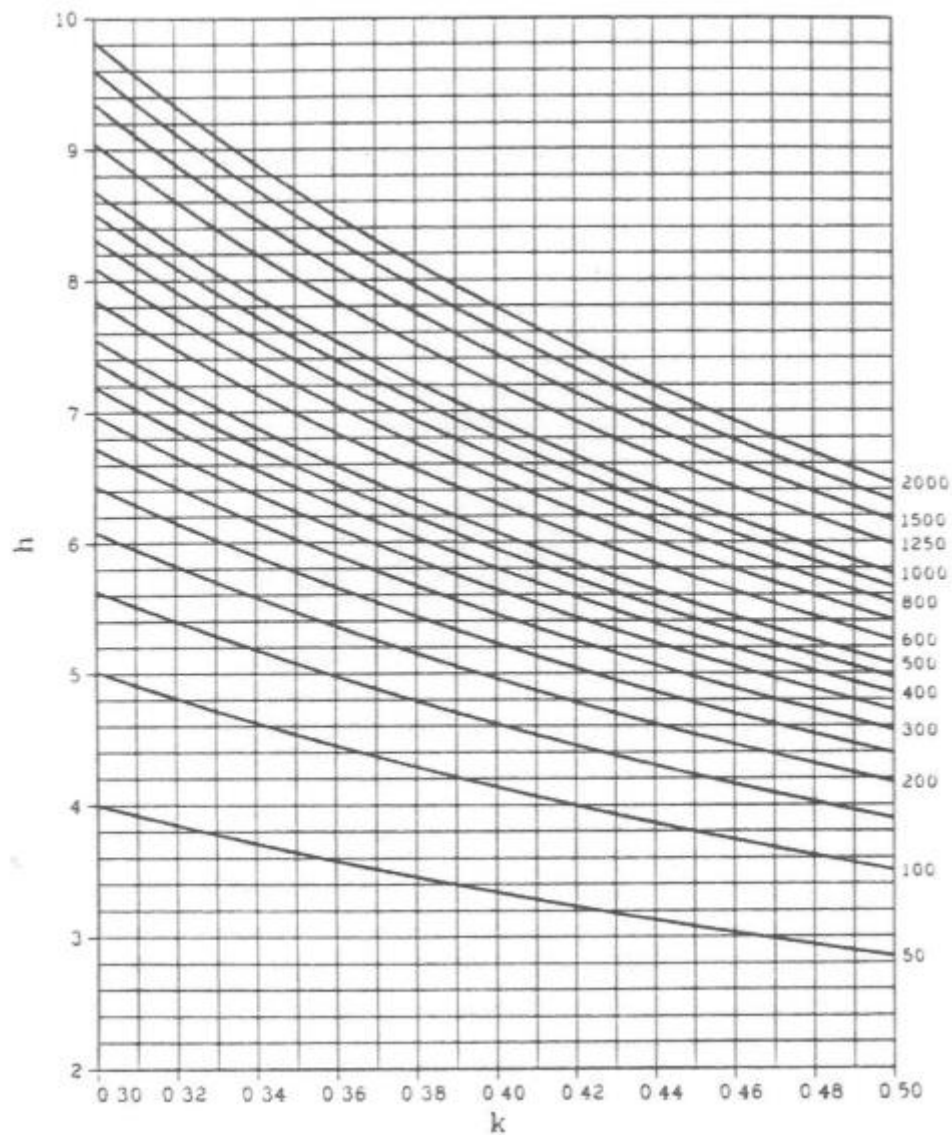


Figura II.2 Combinação de  $k$  e  $h$  da carta *CUSUM*, com  $C_0 = 0$  e  $T_0 = 0$ , para vários valores de  $ARL_{EmControlo}$  (Fonte de: (Gan, 1991) (Pereira & Requeijo, 2012))

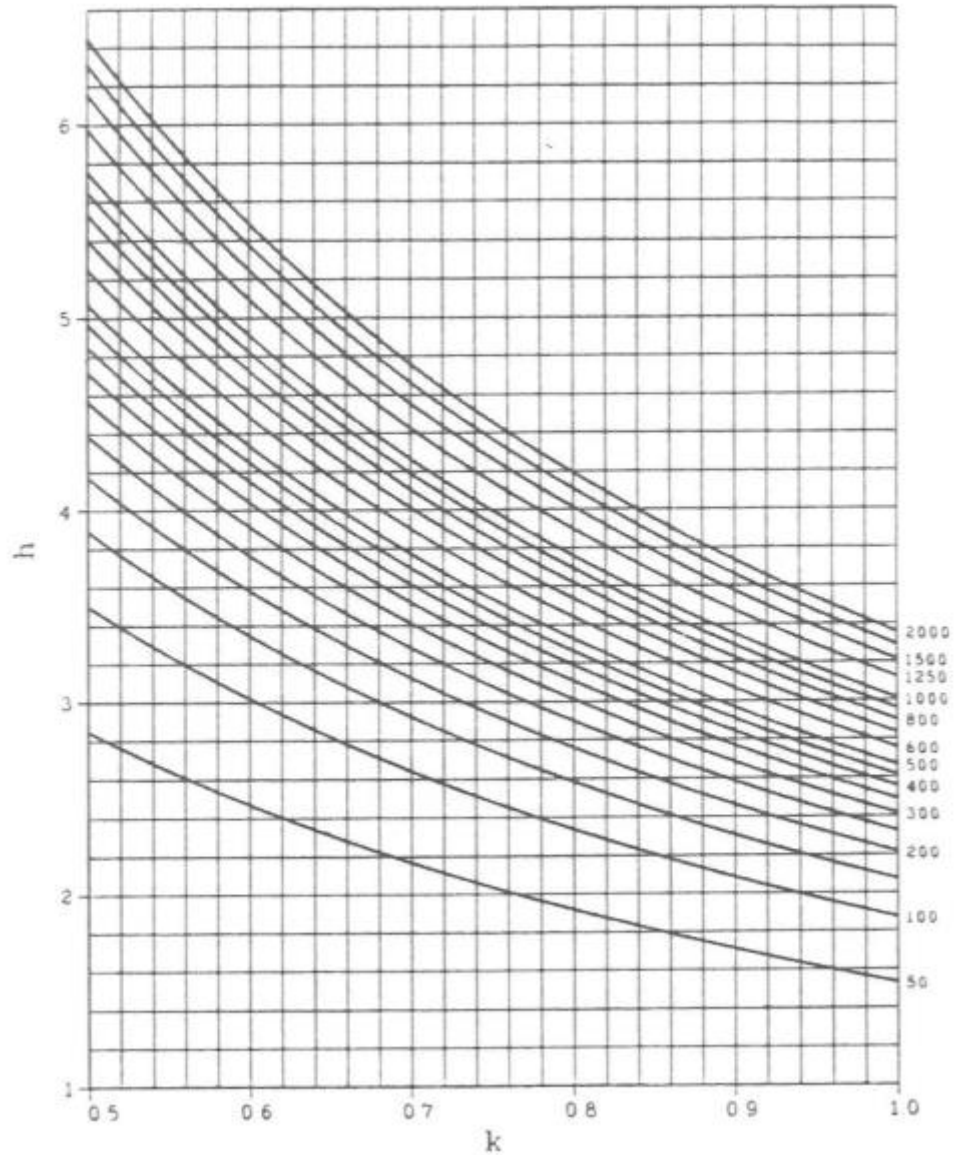


Figura II.3 Combinação de  $k$  e  $h$  da carta  $CUSUM$ , com  $C_0 = 0$  e  $T_0 = 0$ , para vários valores de  $ARL_{EmControle}$  (Fonte de: (Gan, 1991) (Pereira & Requeijo, 2012))

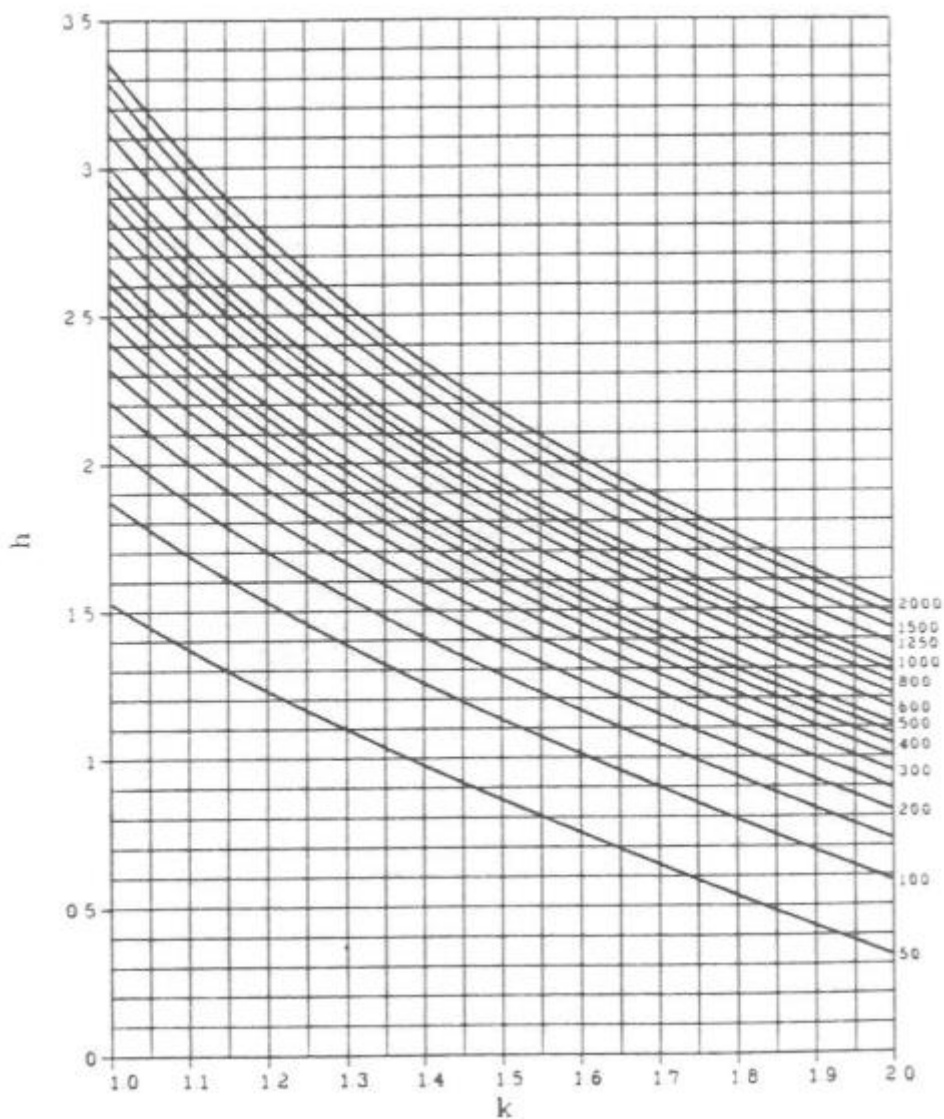


Figura II.4 Combinação de  $k$  e  $h$  da carta  $CUSUM$ , com  $C_0 = 0$  e  $T_0 = 0$ , para vários valores de  $ARL_{EmControle}$  (Fonte de: (Gan, 1991) (Pereira & Requeijo, 2012))

## II.2 Ábacos para as cartas EWMA

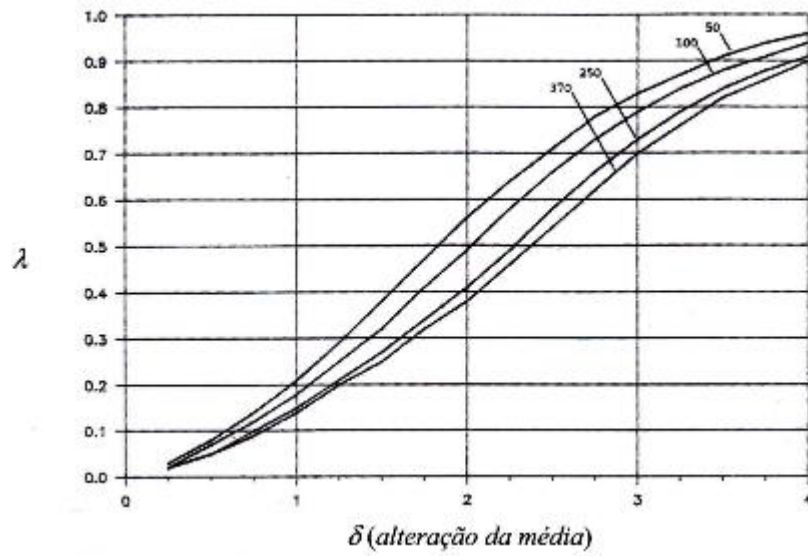


Figura II.5 Valor  $\lambda$ , da carta EWMA, para vários valores de  $ARL_{EnControlo}$  (Fonte de: (Crowder, 1989) (Pereira & Requeijo, 2012))

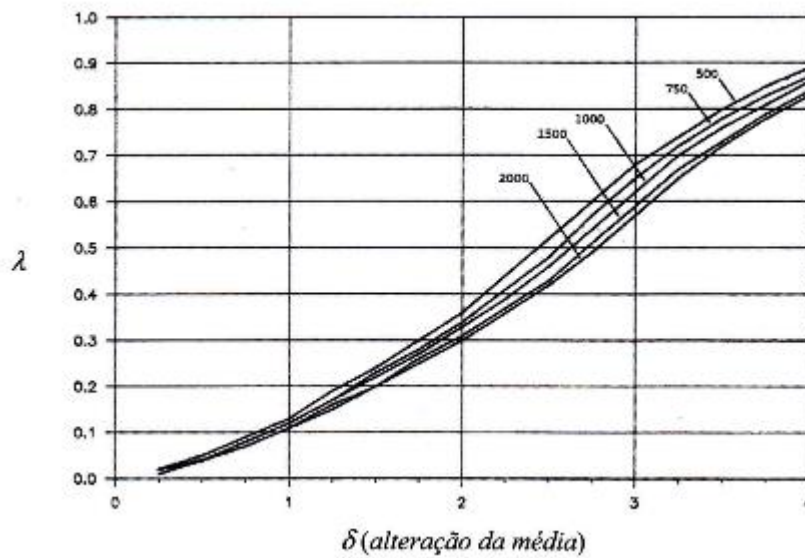


Figura II.6 Valor  $\lambda$ , da carta EWMA, para vários valores de  $ARL_{EnControlo}$  (Fonte de: (Crowder, 1989) (Pereira & Requeijo, 2012))

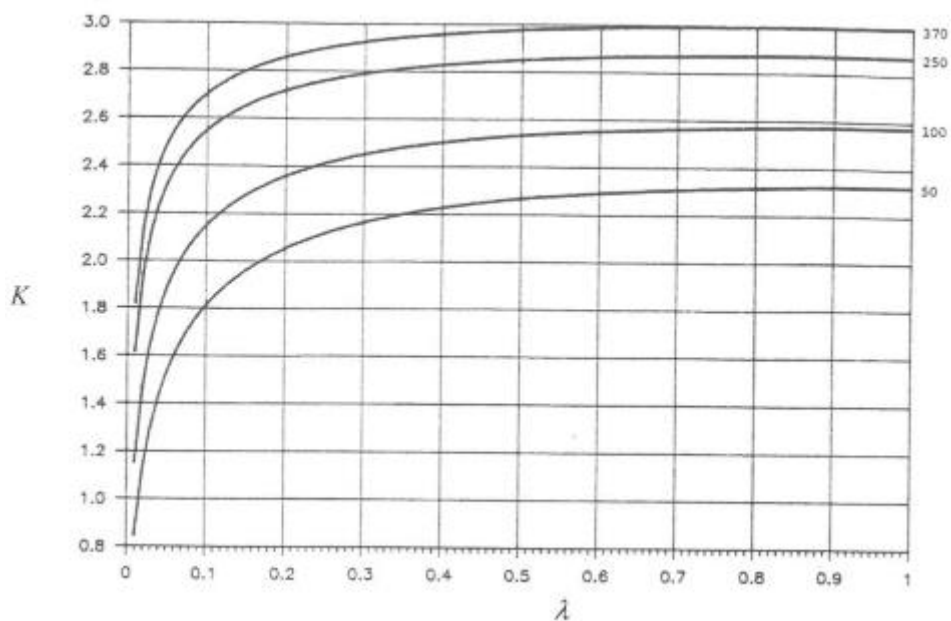


Figura II.7 Valores de  $\lambda$  e  $K$ , da carta *EWMA*, em função de  $ARL_{EmControlo}$  (Fonte de: (Crowder, 1989) (Pereira & Requeijo, 2012))

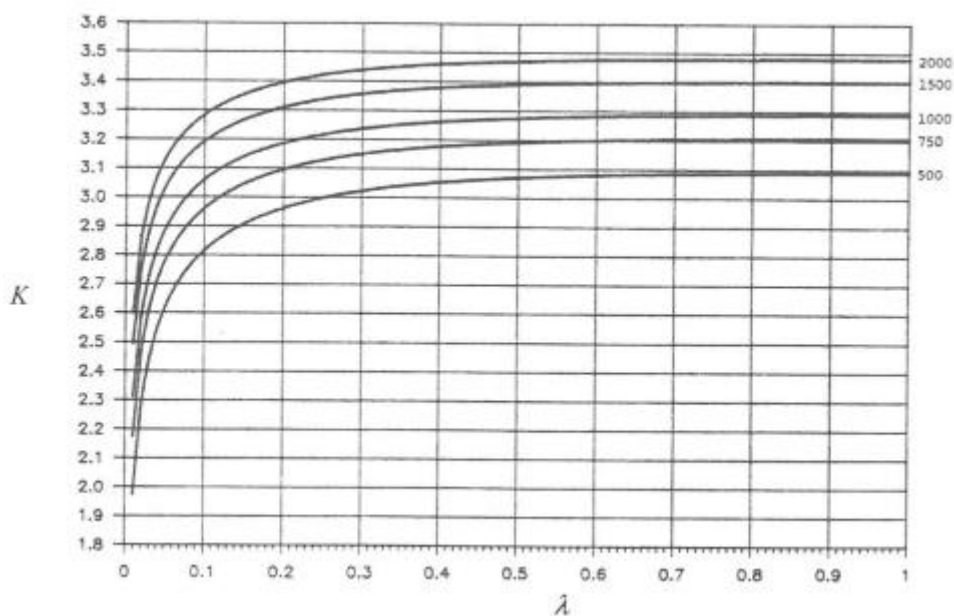


Figura II.8 – Valores de  $\lambda$  e  $K$ , da carta *EWMA*, em função de  $ARL_{EmControlo}$  (Fonte de: (Crowder, 1989) (Pereira & Requeijo, 2012))

## **ANEXO III**

### **COMPLEMENTO DE VIBRAÇÕES**



Os valores limite de acordo com Norma ISO 2372:

Tabela III.1 ISO 2372-Vibration Severity (Fonte de: ISO, 2003))

Vibration Severity Range Limits (Velocity) From ISO 2372		Vibration Severity Ranges for Machines Belonging to:					
In/Sec (PK)	MM/Sec (RMS)	Class I < 20 HP	Class II 20-100 HP	Class III >100 HP	Class IV >100 HP		
0.015	0.28	A	A	A	A (Good)		
0.025	0.45						
0.039	0.71	B	B	B			
0.062	1.12						
0.099	1.80	C	C	C	B (Allowable)		
0.154	2.80						
<b>0.248</b>	<b>4.50</b>	D	D	C	C (Tolerable)		
<b>0.392</b>	<b>7.10</b>						
0.617	11.2			D	D	D	D (Not Permissible)
0.993	18.0						
1.540	28.0						
2.480	45.0						
3.940	71.0						

**A: Good**  
**B: Allowable**  
**C: Tolerable**  
**D: Not Permissible**

**Suggested Classifications:**  
**Class I:** Small (up to 15kW) machines and subassemblies of larger machines.  
**Class II:** Medium size (15kW to 75kW) machines without special foundations, or machines up to 300kW rigidly mounted on special foundations.  
**Class III:** Large rotating machines rigidly mounted on foundations which are stiff in the direction of vibration measurement.  
**Class IV:** Large rotating machines mounted on foundations which are flexible in the direction of vibration measurement.

IMPACT Engineering Copyright © 2003. All rights reserved.  
 14209 29th Street East, Ste 105 - Sumner, WA 98390  
 Tel: (253) 942-9000 - FAX (253) 942-9009  
 Email Address: [ops@impactengineering.com](mailto:ops@impactengineering.com)

Tabela III.2 Soluções para problemas de vibrações (Fonte de: (Courrecch &amp; Eshleman, 2002) (Eshleman, 1999))

Natureza da Falha	Frequência da Vibração Dominante, Hz= rpm/60	Espetro, Forma de onda	Direção	Observações
Componentes rotativos desequilibrados	1x rpm		Radial	Causado por excesso de vibração no veio
Veio desalinhado	Usualmente 1x rpm Frequente 2x rpm Raramente 3 e 4x rpm	Distinto 1x com valores iguais ou superiores de 2x, 3x, 1x axial	Radial e axial	Falha comum. Efetuar alinhamento a quente e/ou a frio
Veio empenado	Usualmente 1x rpm	Abaixamento da vibração em torno da velocidade crítica num gráfico de Bodé <sup>1</sup>	Radial e axial	Falha comum. Aquecimento ou peening para endireitar o rotor (permitir a oscilação axial do rotor)
Velocidades críticas ou Whirl histerese	1x, 2x, 3x, etc	Vibração amplificada devido à proximidade da velocidade de funcionamento à frequência natural	Primariamente radial	Vibração amplificada pela velocidade de operação ser próxima da frequência natural. Afinar frequência natural
Ressonância	1x, 2x, 3x	Alta sensibilidade de equilibragem, alta amplitude de vibração na ordem da velocidade de funcionamento		Alterar a frequência natural estrutural
Anomalias em rolamentos	Impacto nos componentes das pistas dos rolamentos Vibrações a altas frequências (2 a 60kHz) relacionadas com ressonâncias radiais nas pistas dos rolamentos.		Radial e axial	As frequências são as indicadas para os rolamentos anteriormente
Desgaste do apoio de escorregamento e folga excessiva	1x, sub-harmônicas, ordens	Alto 1x, alto 1/2x, algumas vezes 1-1/2 ou ordens, não pode ser equilibrado		Substituir apoio
Folgas	1x maior número de ordens, pode suceder 1/2x	Alta 1x com ordens de mais baixo nível, 1/2 ordem, baixa vibração axial	Primariamente radial	As folgas podem ser desenvolvidas à velocidade e temperatura de funcionamento.
Oil Whirl e Whip em rolamentos soltos	Ligeiramente inferior à rotação do veio (42 a 48%)		Primariamente radial	Aplica-se a altas velocidades (ex: Turbos)
Engrenagens desgastadas ou danificadas	Frequências de engrenamento dos dentes (rotações do veio x número de dentes) e harmônicas.		Radial e axial	Bandas laterais nas frequências duma engrenagem, indica excentricidade. Normalmente detetável com uma análise acurada das bandas laterais.
Travamento do acoplamento	1x, 2x, 3x, etc	1x com alto 2x semelhante ao desalinhamento. Arranque e paragem podem produzir diferentes padrões de vibração		Substituir acoplamento ou remover sugidade
Falha mecânica	2x rpm			Também sub e interharmônicas como no problema das pistas dos rolamentos
Correias com defeito	1,2,3 e 4x rpm da correia		Radial	O problema pode ser identificado facilmente através de um estroboscópio
Variabilidade Térmica	1x	1x variando o ângulo de fase e		Equilíbrio de compromisso ou remoção

<sup>1</sup> Gráfico circular de fatias.

		amplitude com a carga		do problema
Desequilíbrio	1x rpm e/ou múltiplos para desequilíbrio de elevada ordem	Distinto 1x com muitos baixo valores de 2x, 3x, órbitas elípticas e circulares, fase constante	Primariamente radial	Equilíbrio local ou em oficina
Aumento turbulência	Frequência e harmónica de passagem de pá e ventoinha		Radial e axial	Um nível elevado indica uma turbulência elevada
Vibrações induzidas eletricamente	1x rpm 2 vezes a linha frequência		Radial e axial	Deve desaparecer quando a energia é cortada
Excentricidade	1x	Alta 1x		Moente da máquina para concentricidade
Distorção	1x e ordens	1x da pré carga dos rolamentos, 2x frequência de linha, folga de ar no motor		Atenuar a inconsistência do chão



## **ANEXO IV**

### **COMPLEMENTO DA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA NUM PROTÓTIPO**



## IV.1 Cartas Univariadas

### IV.1.1 Fase 1

#### IV.1.1.1 Resultados da Var1

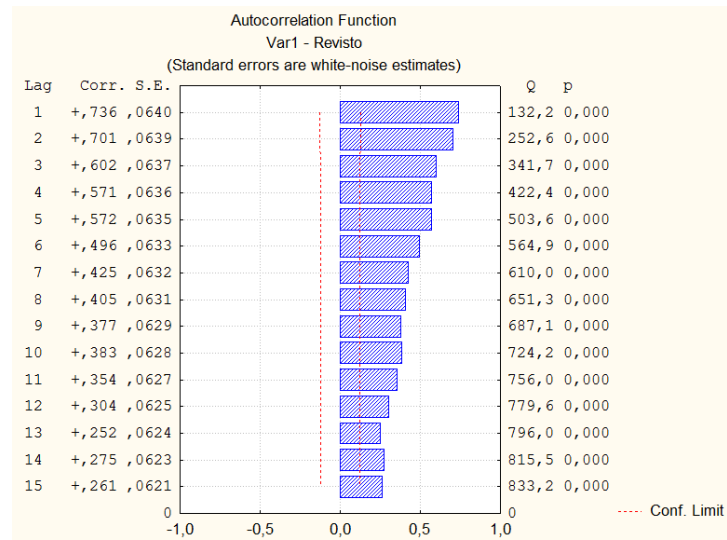


Figura IV.1 FACE dos dados - Var1

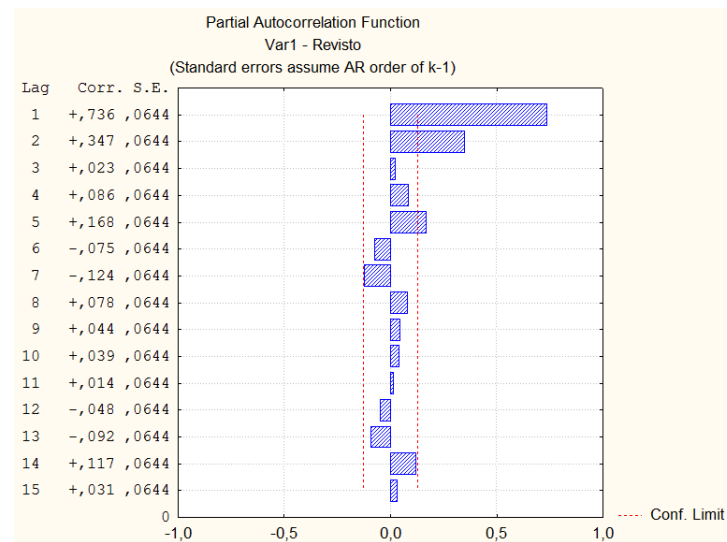


Figura IV.2 FACPE dos dados - Var1

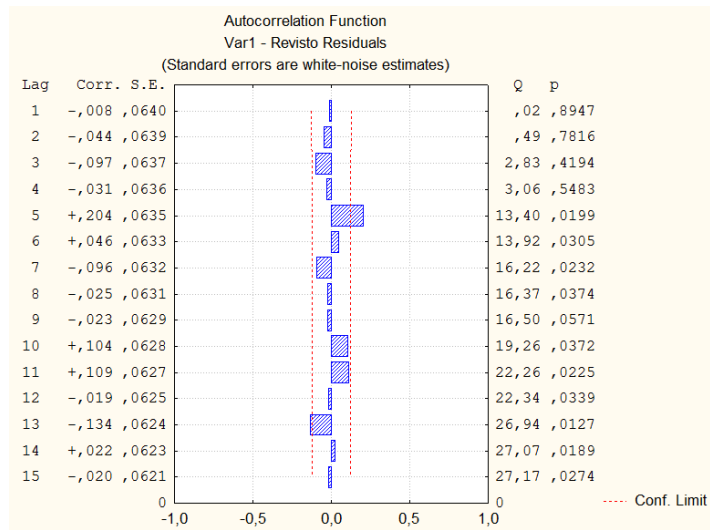


Figura IV.3 FACE dos resíduos - Var1

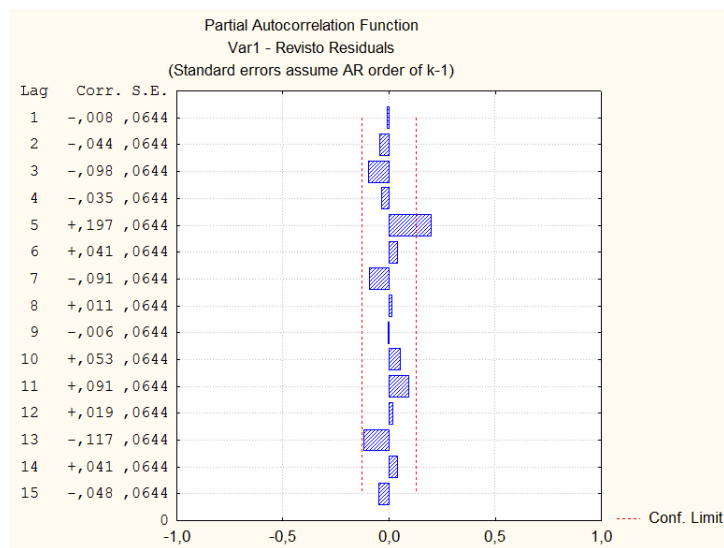


Figura IV.4 FACPE dos resíduos - Var1

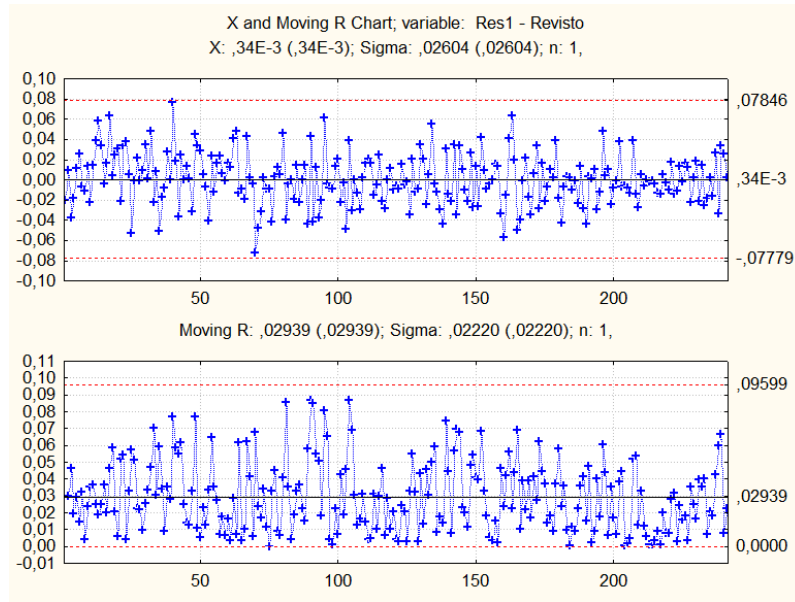


Figura IV.5 Carta de controlo e -MR dos resíduos - Var1

Tabela IV.1 Parâmetros do modelo ajustado à Var1

$\mu$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\overline{MR}$	d 2	$\xi$	$\sigma_\epsilon$	$\mu$	$\sigma$
0,405	0,481	0,348	0,736	0,347	0,029	1,128	0,069	0,026	0,405	0,036

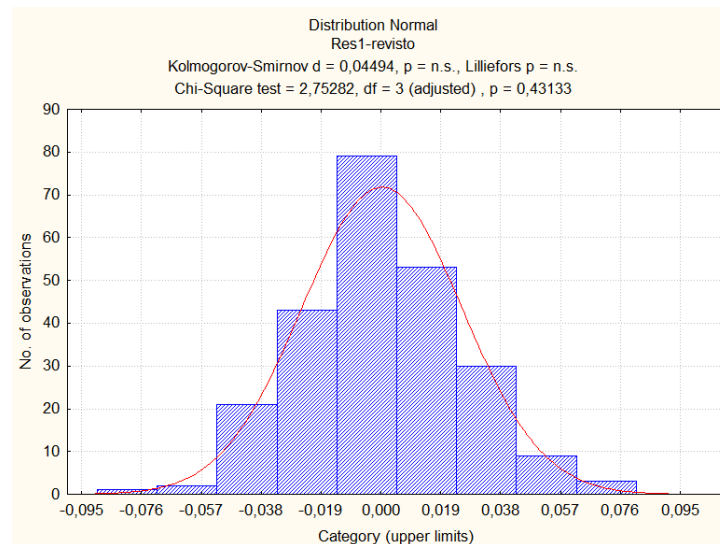


Figura IV.6 Verificação da Normalidade resíduos - Var1

A normalidade é verificada com o teste de Kolmogorov-Smirnov ( $D_{Crítico} = \frac{0,886}{\sqrt{N}} = \frac{0,886}{\sqrt{241}} = 0,0571$  para  $\alpha = 5\%$ ); para o ponto 1:  $d = 0,04494$ , Figura IV.6.

Uma vez que  $d < D_{Crítico}$  a condição de normalidade dos dados é aceite.

IV.1.1.2 Resultados da Var3

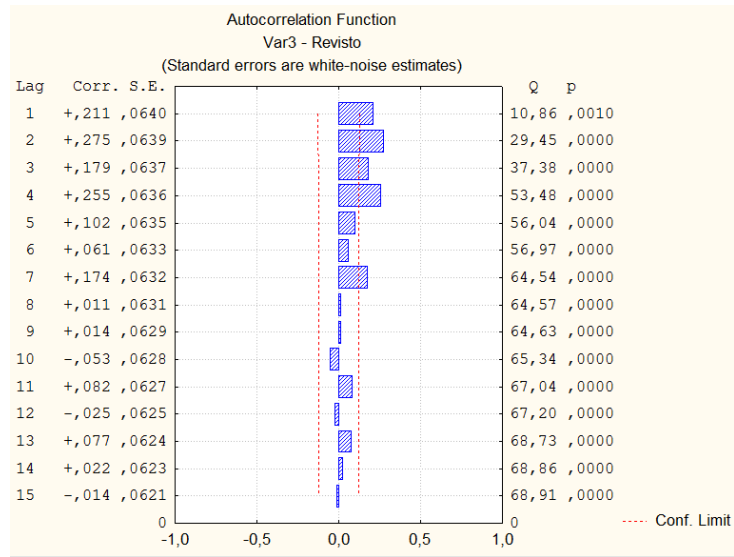


Figura IV.7 FACE dos dados – Var3

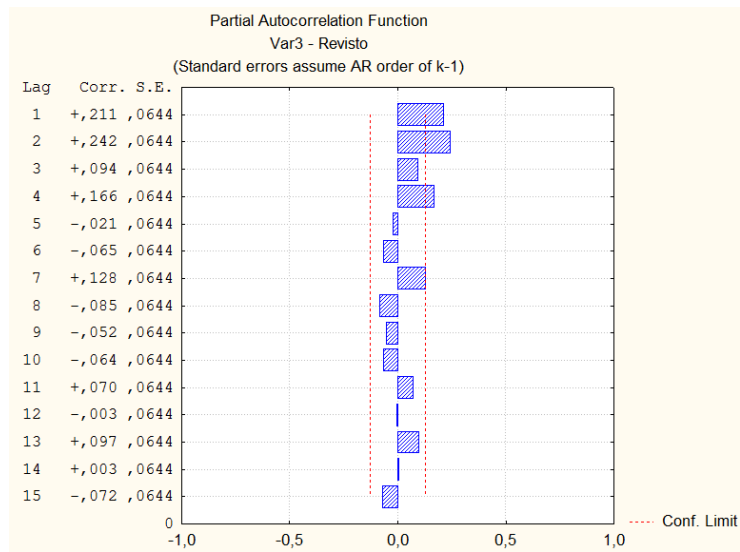


Figura IV.8 FACPE dos dados – Var3

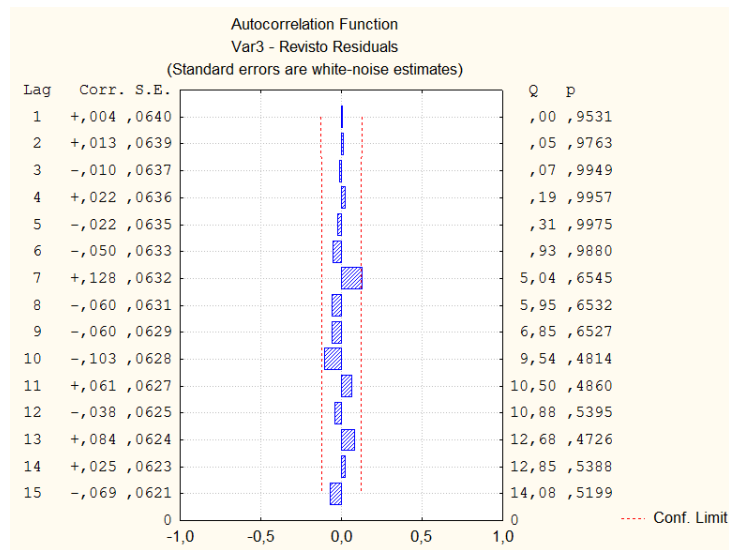


Figura IV.9 FACE dos resíduos – Var3

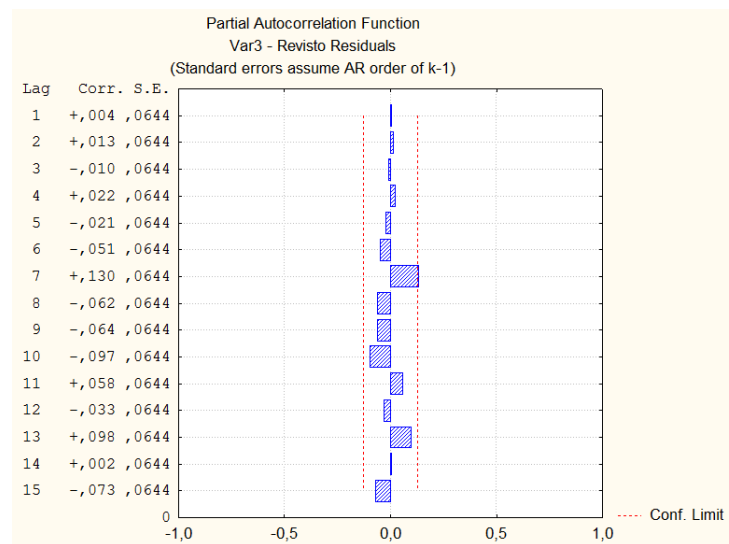


Figura IV.10 FACPE dos resíduos – Var3

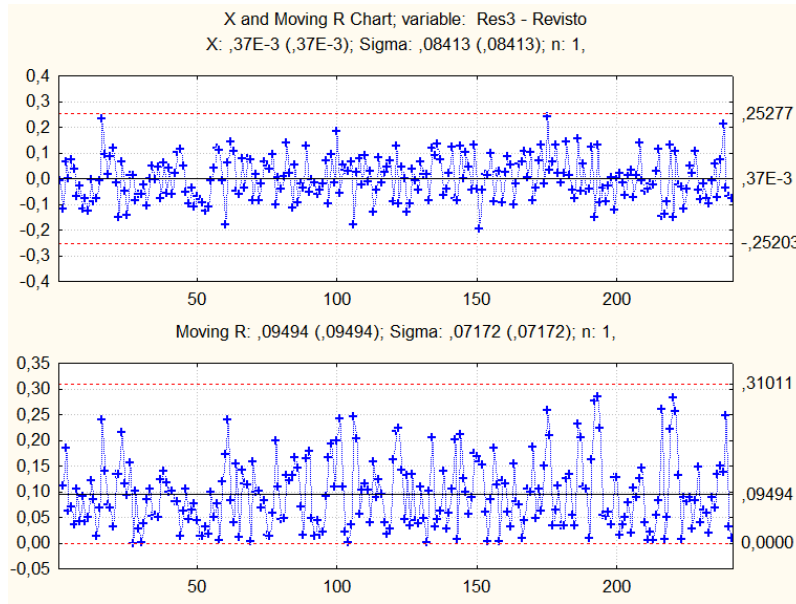


Figura IV.11 Carta de controlo  $e-MR$  dos resíduos – Var3

Tabela IV.2 Parâmetros do modelo ajustado à Var3

$\mu$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\overline{MR}$	d 2	$\xi$	$\sigma_\varepsilon$	$\mu$	$\sigma$
0,7408	0,1888	0,1688	0,2420	0,1660	0,0949	1,128	0,04759	0,0842	0,7408	0,0875

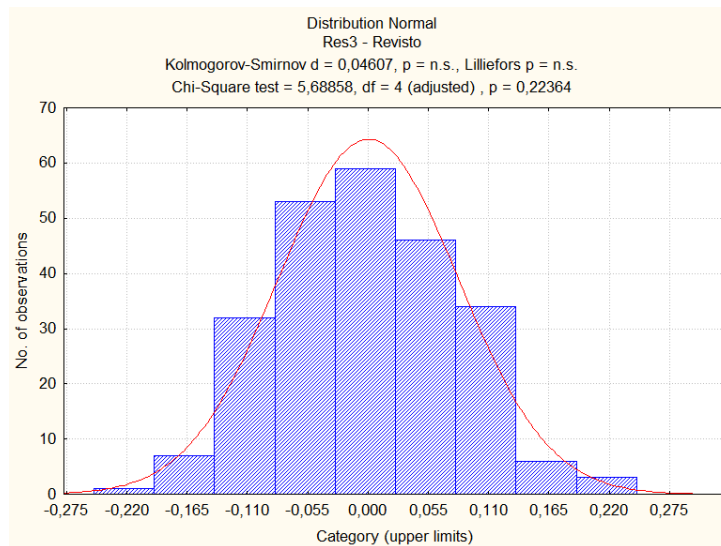


Figura IV.12 Verificação da Normalidade resíduos – Var3

A normalidade é verificada com o teste de Kolmogorov-Smirnov ( $D_{Crítico} = \frac{0,886}{\sqrt{N}} = \frac{0,886}{\sqrt{241}} = 0,0571$  para  $\alpha = 5\%$ ); para o ponto 1:  $d = 0,04607$ , Figura IV.12. Uma vez que  $d < D_{Crítico}$  a condição de normalidade dos dados é aceite.

## IV.1.1.3 Resultados da Var4

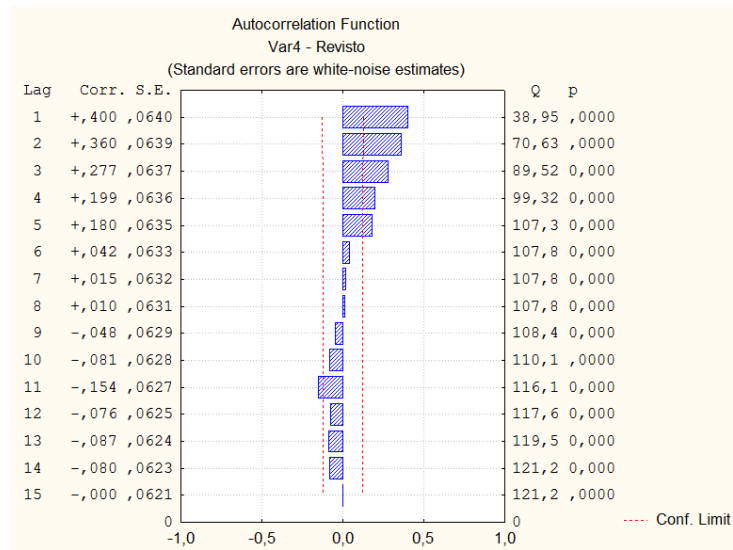


Figura IV.13 FACE dos dados – Var4

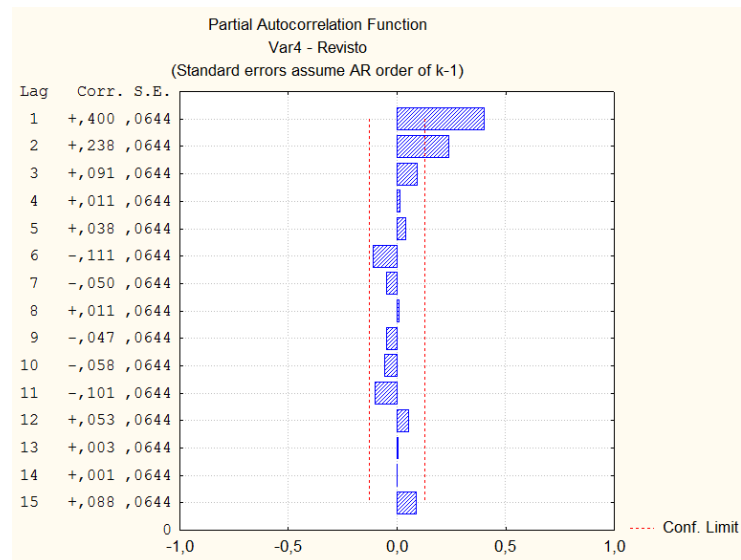


Figura IV.14 FACPE dos dados – Var4

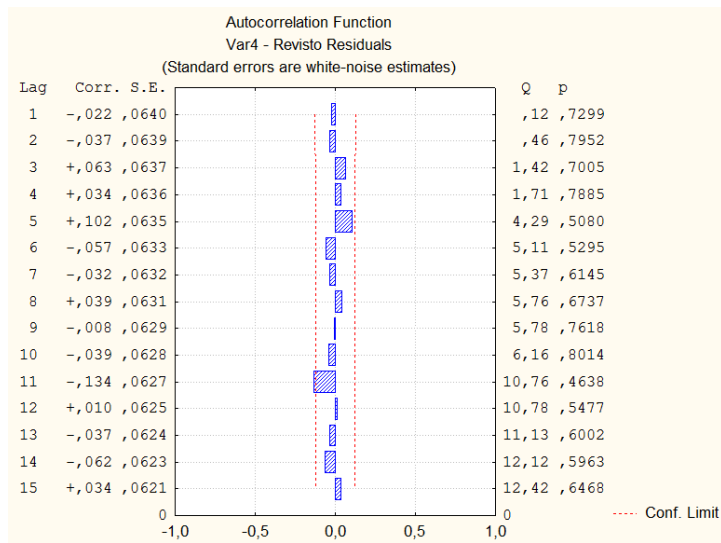


Figura IV.15 FACE dos resíduos – Var4

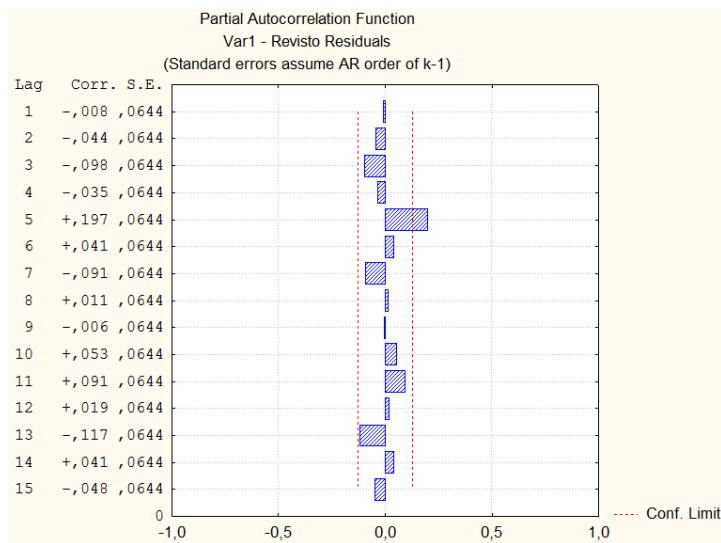


Figura IV.16 FACPE dos resíduos – Var4

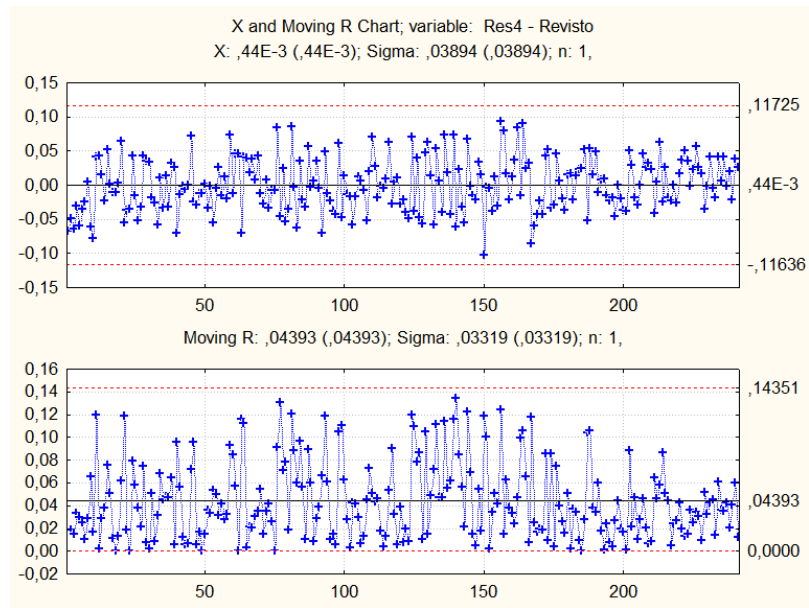


Figura IV.17 Carta de controlo e -MR dos resíduos - Var4

Tabela IV.3 Parâmetros do modelo ajustado à Var4

$\mu$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\overline{MR}$	d 2	$\xi$	$\sigma_\epsilon$	$\mu$	$\sigma$
0,5223	0,3055	0,2409	0,4000	0,2380	0,0439	1,128	0,2370	0,0389	0,5223	0,0430

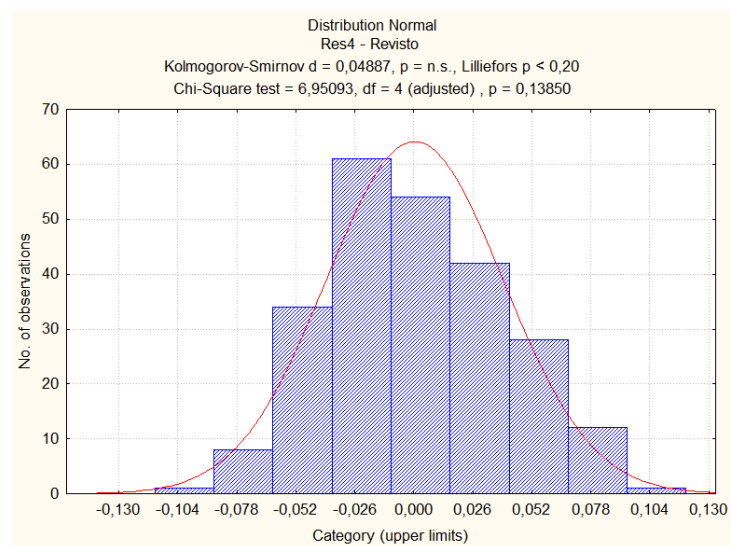


Figura IV.18 Verificação da Normalidade resíduos - Var4

A normalidade é verificada com o teste de Kolmogorov-Smirnov ( $D_{Crítico} = \frac{0,886}{\sqrt{N}} = \frac{0,886}{\sqrt{241}} = 0,0571$  para  $\alpha = 5\%$ ); para o ponto 1:  $d = 0,04887$ , Figura IV.18. Uma vez que  $d < D_{Crítico}$  a condição de normalidade dos dados é aceite.

**IV.1.2 Fase 2**

**IV.1.2.1 Resultados da Var1**

**IV.1.2.1.1 Carta CUSUMM – Var1**

Neste anexo vamos representar as cartas de controlo somente para  $\Delta=0,5\sigma$ , pois como se pode verificar para a Var 2, também para as outras variáveis é quando as cartas de controlo CUSUMM e EWMAM se mostram mais sensíveis.

Tabela IV.4  $(T_L)_N$  e  $T_L$

$(T_L)_N$		1,12
$T_L$	0,5 $\sigma$	0,69
	1 $\sigma$	0,69
	1,5 $\sigma$	0,69

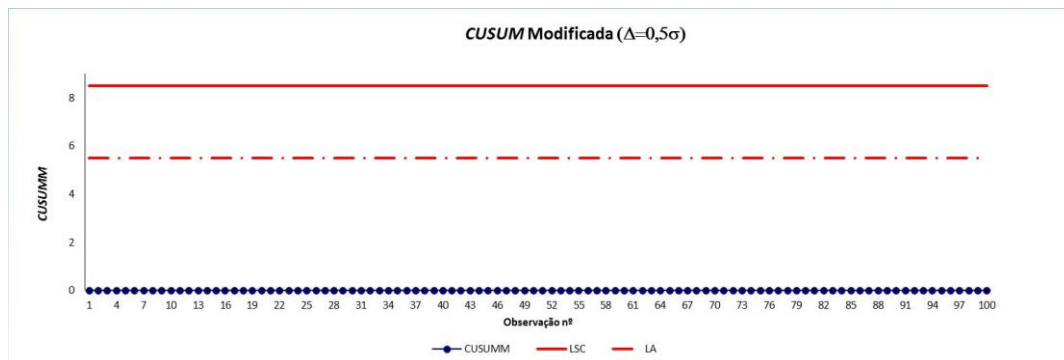


Figura IV.19 Carta CUSUMM – sem avaria e 1º e 2º agravamento para  $\Delta=0,5\sigma$

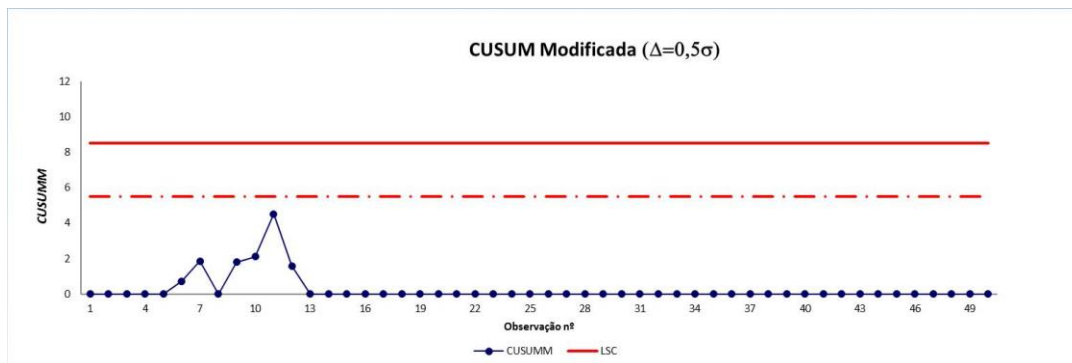


Figura IV.20 Carta CUSUMM – 3º agravamento para  $\Delta=0,5\sigma$

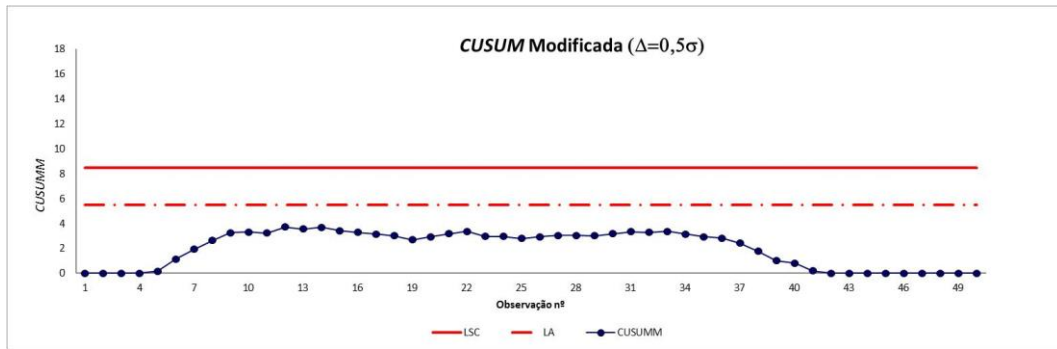


Figura IV.21 Carta CUSUMM – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

**IV.1.2.1.2 Carta EWMAM – Var1**

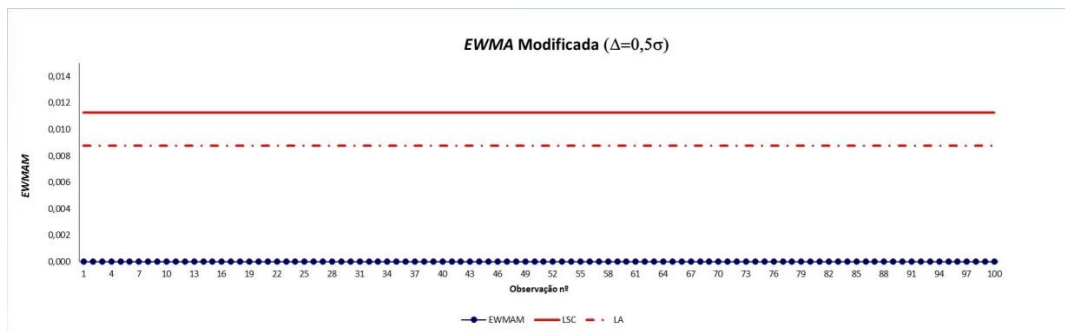


Figura IV.22 Carta EWMAM – sem avaria e 1º, 2º e 3º agravamento para  $\Delta=0,5\sigma$

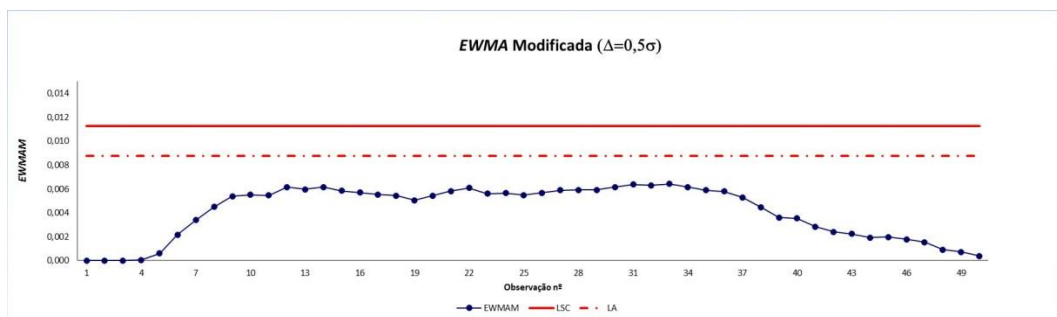


Figura IV.23 Carta EWMAM – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

### IV.1.2.2 Resultados da Var2

#### IV.1.2.2.1 Cartas CUSUMM – Var2

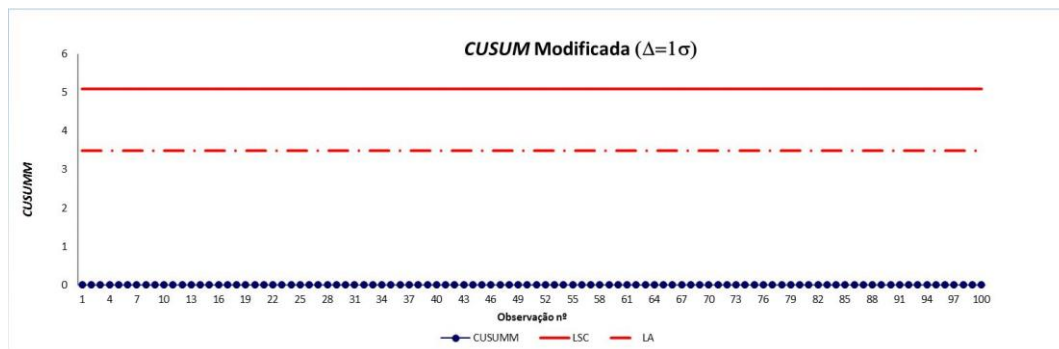


Figura IV.24 Carta CUSUMM – sem avaria para  $\Delta=1\sigma$

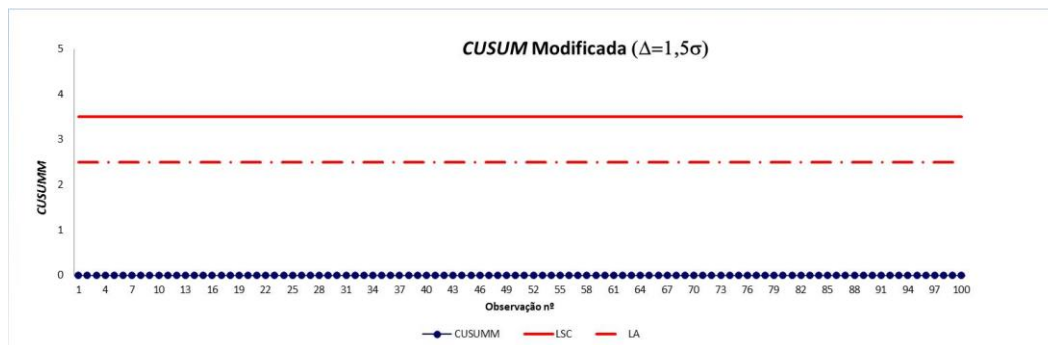


Figura IV.25 Carta CUSUMM – sem avaria para  $\Delta=1,5\sigma$

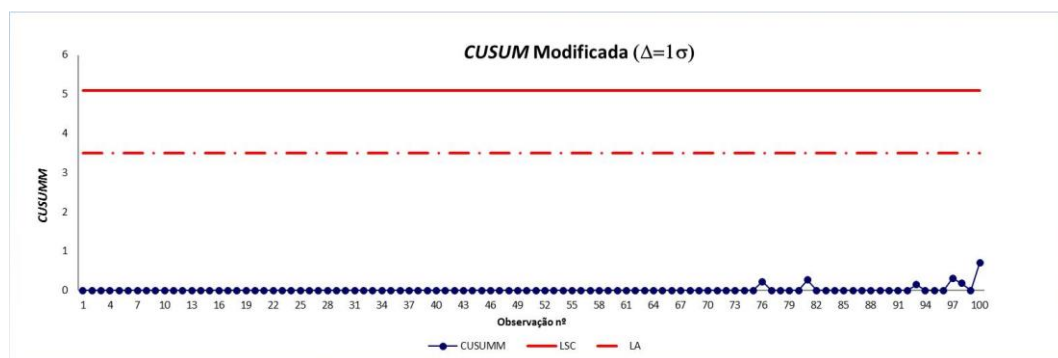


Figura IV.26 Carta CUSUMM – 1º agravamento da avaria para  $\Delta=1\sigma$

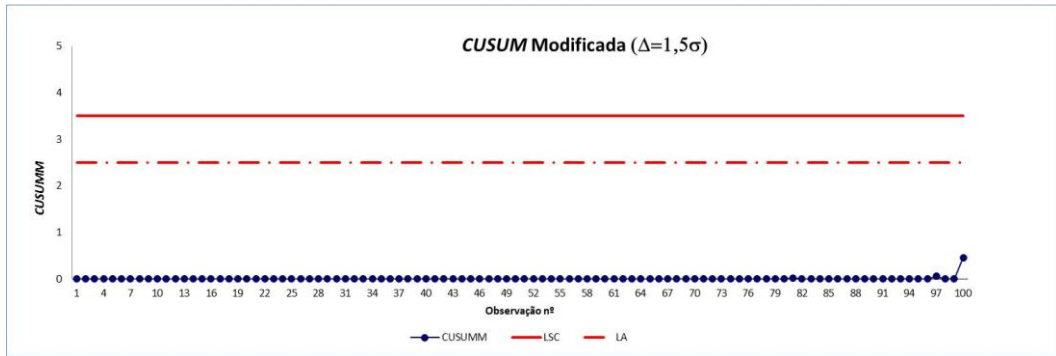


Figura IV.27 Carta CUSUMM – 1º agravamento da avaria para  $\Delta=1,5\sigma$

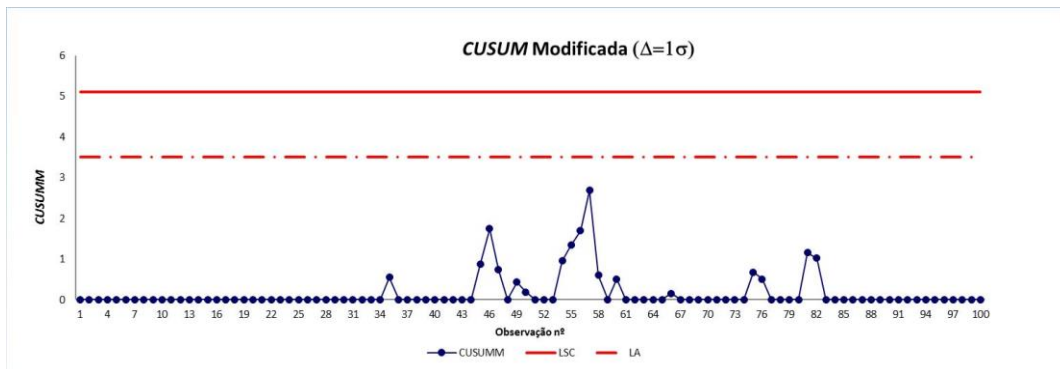


Figura IV.28 Carta CUSUMM – 2º agravamento da avaria para  $\Delta=1\sigma$

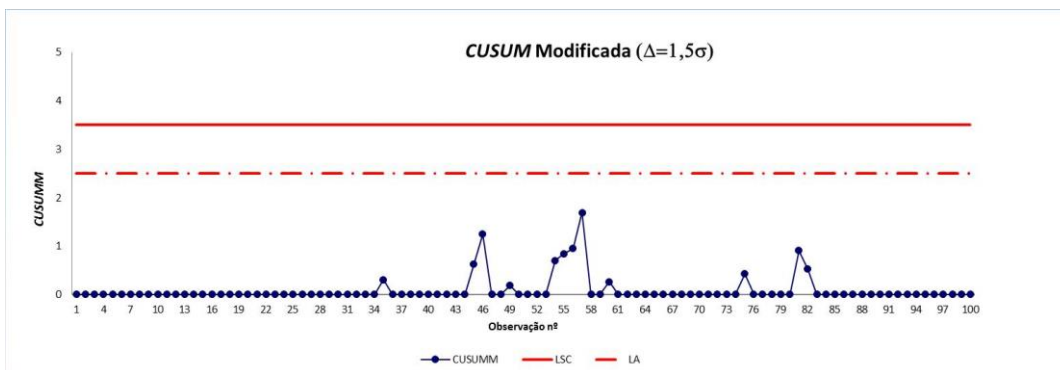


Figura IV.29 Carta CUSUMM – 2º agravamento da avaria para  $\Delta=1,5\sigma$

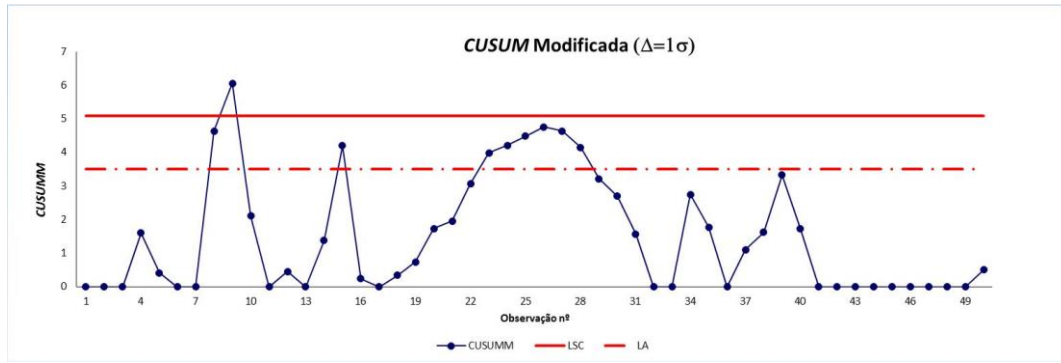


Figura IV.30 Carta *CUSUMM* – 3º agravamento da avaria para  $\Delta=1\sigma$

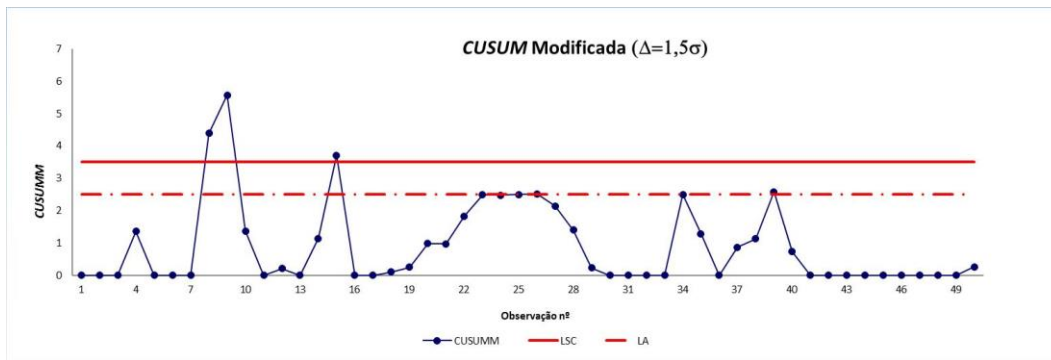


Figura IV.31 Carta *CUSUMM* – 3º agravamento da avaria para  $\Delta=1,5\sigma$

**IV.1.2.2.2 Cartas EWMA – Var2**

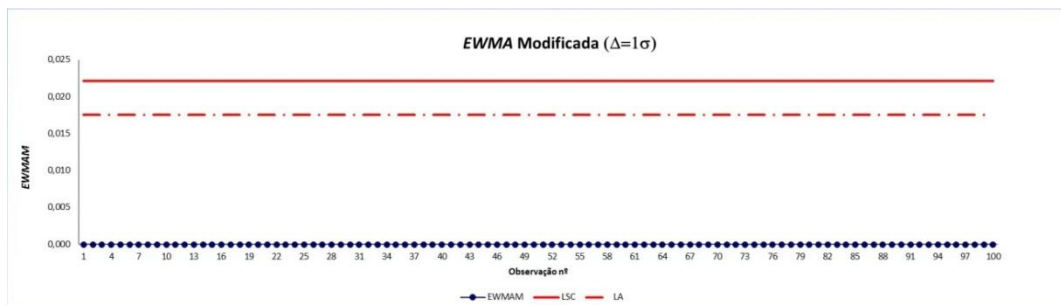


Figura IV.32 Carta *EWMA* – sem avaria para  $\Delta=1\sigma$

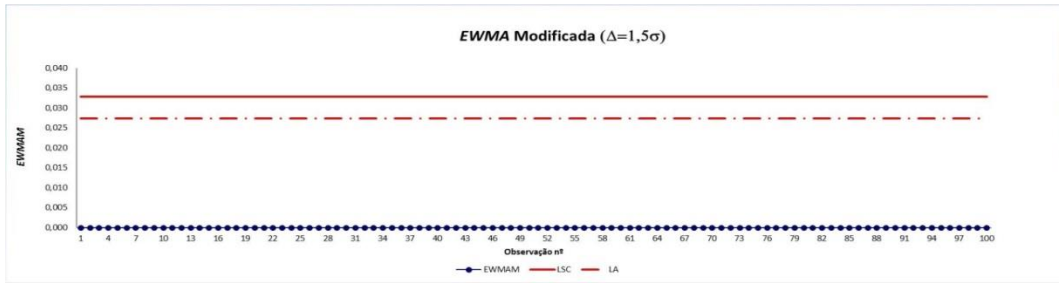


Figura IV.33 Carta *EWMAM* – sem avaria para  $\Delta=1.5\sigma$

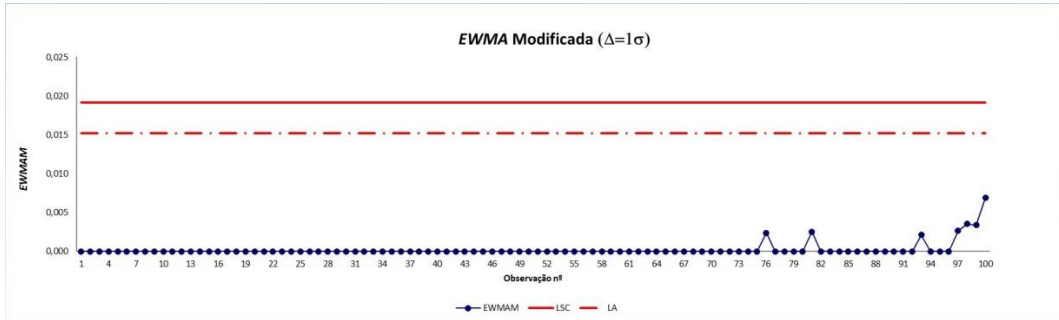


Figura IV.34 Carta *EWMAM* – 1º agravamento da avaria para  $\Delta=1\sigma$

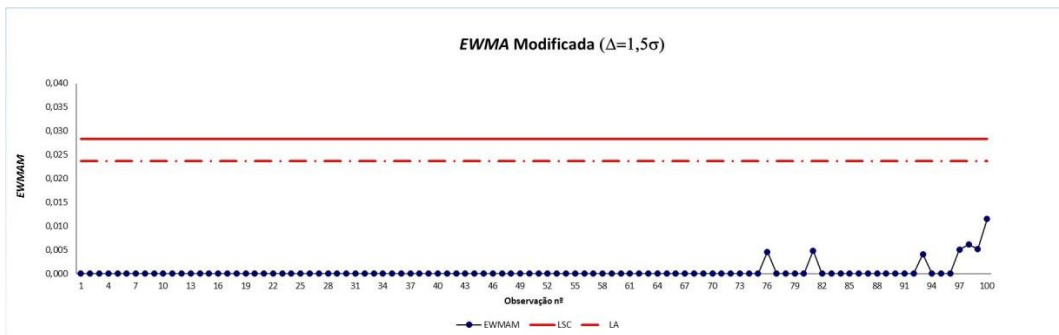


Figura IV.35 Carta *EWMAM* – 1º agravamento da avaria para  $\Delta=1,5\sigma$

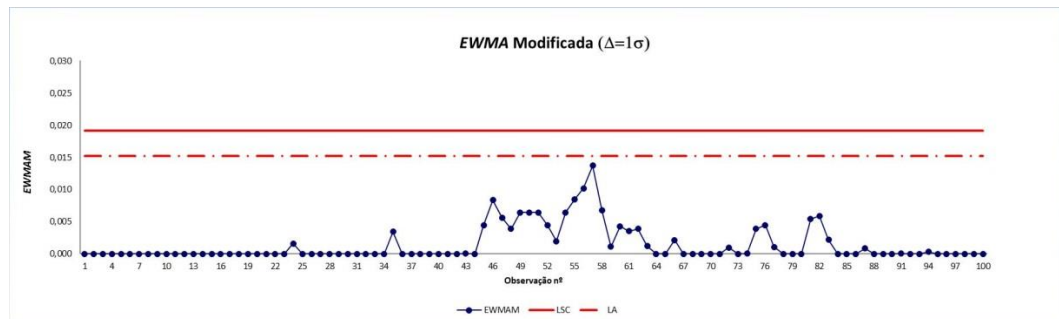


Figura IV.36 Carta *EWMAM* – 2º agravamento da avaria para  $\Delta=1\sigma$

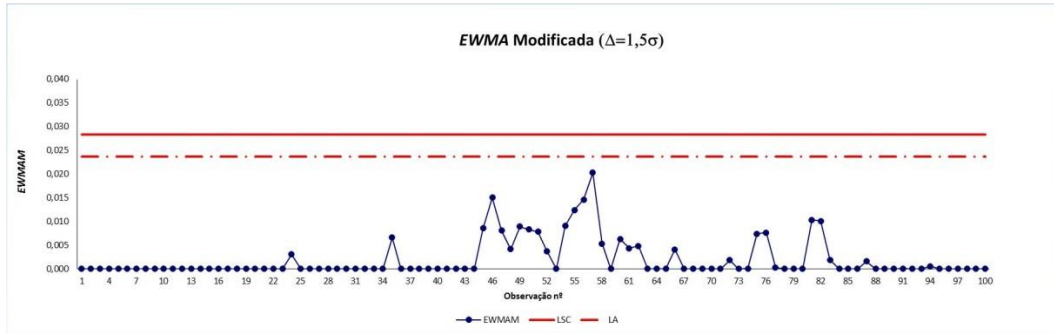


Figura IV.37 Carta EWMAM – 2º agravamento da avaria para  $\Delta=1,5\sigma$

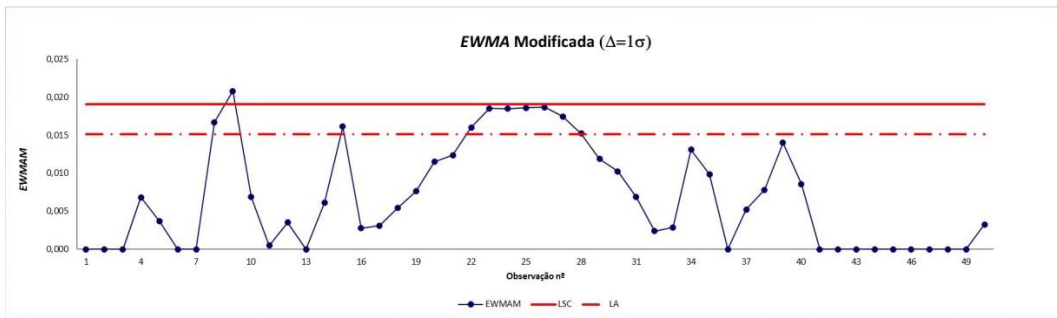


Figura IV.38 Carta EWMAM – 3º agravamento da avaria para  $\Delta=1\sigma$

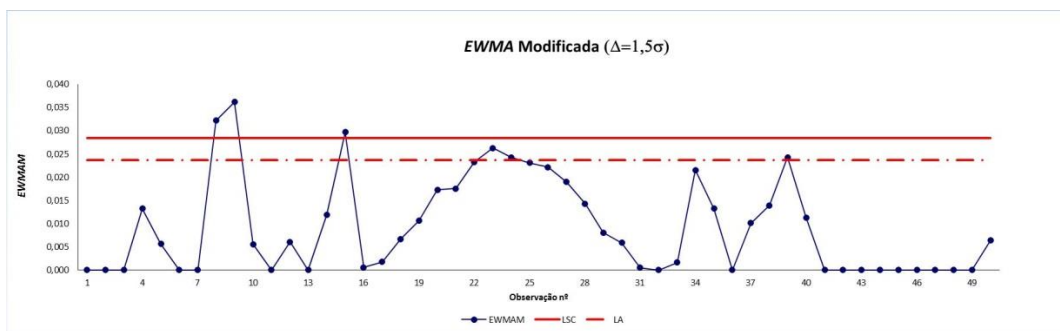


Figura IV.39 Carta EWMAM – 3º agravamento da avaria para  $\Delta=1,5\sigma$

### IV.1.2.3 Resultados da Var3

#### IV.1.2.3.1 Cartas CUSUMM – Var3

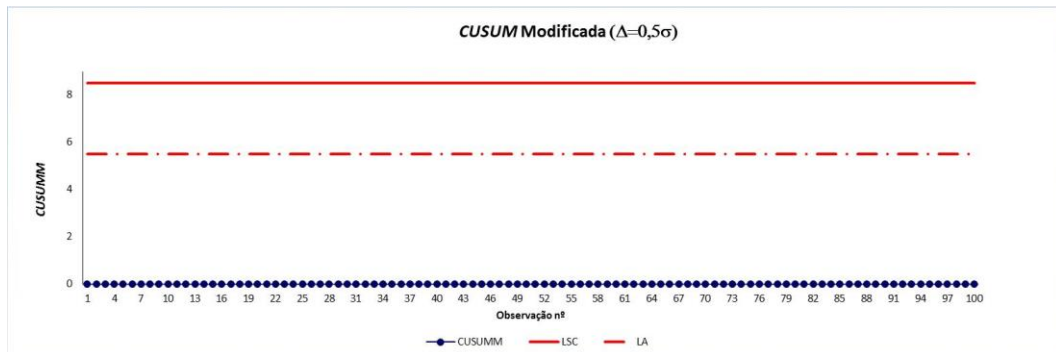


Figura IV.40 Carta CUSUMM – sem avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

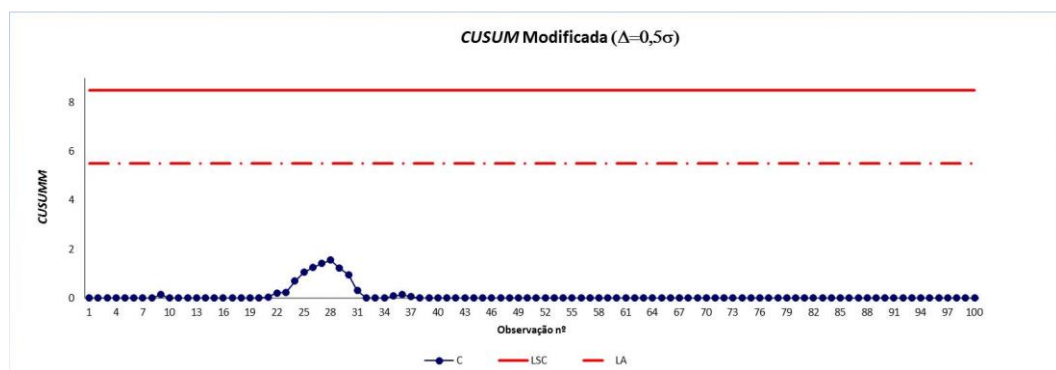


Figura IV.41 Carta CUSUMM – 1º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

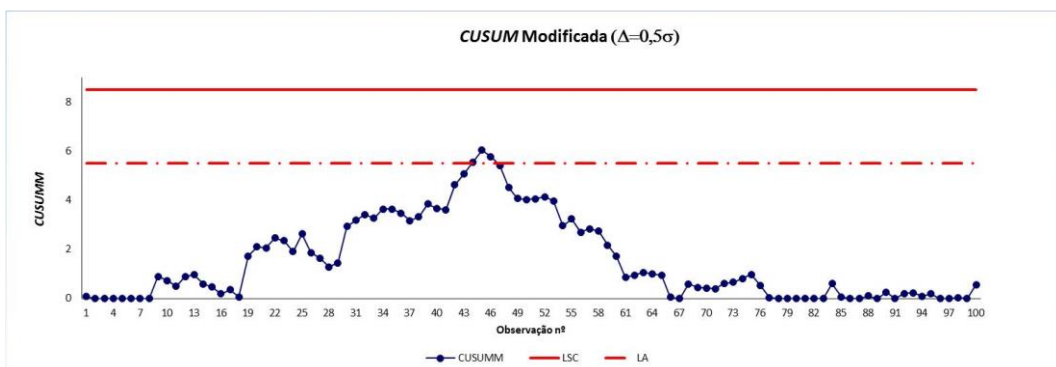


Figura IV.42 Carta CUSUMM – 2º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

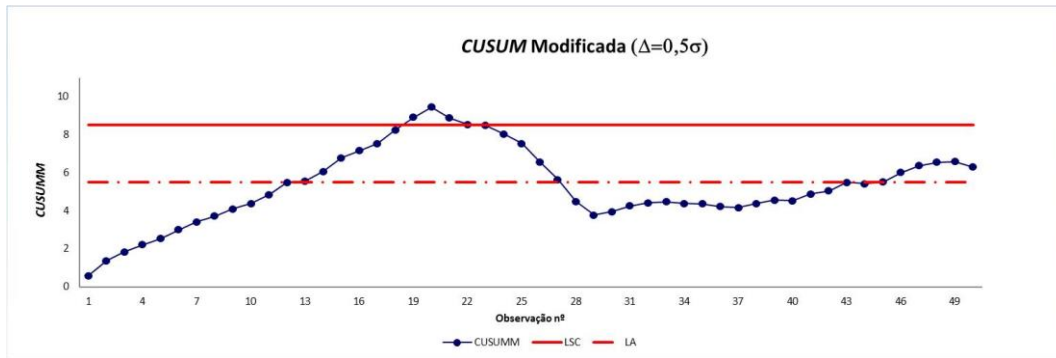


Figura IV.43 Carta *CUSUMM* – 3º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

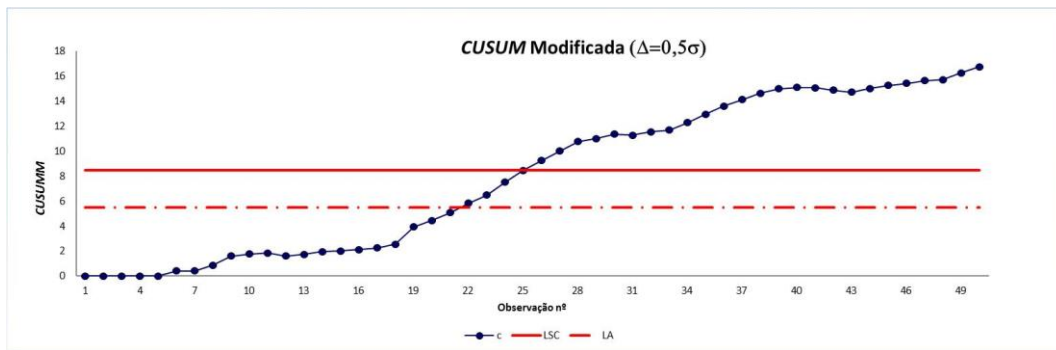


Figura IV.44 Carta *CUSUMM* – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

**IV.1.2.3.2 Carta *EWMAM* – Var3**

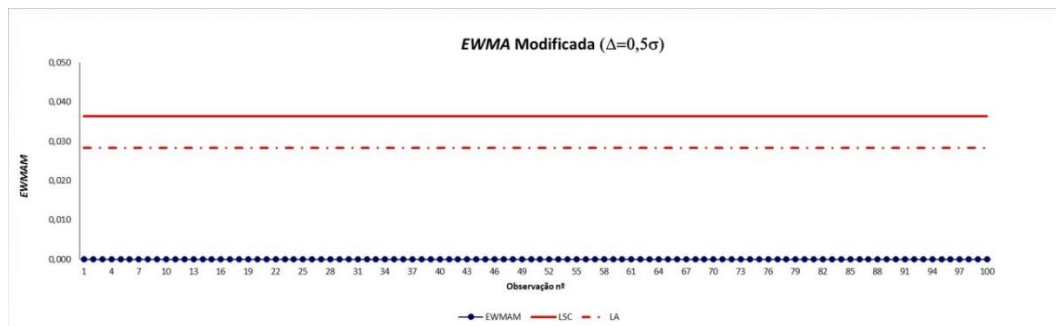


Figura IV.45 Carta *EWMAM* – sem avaria e 1º agravamento para  $\Delta=0,5\sigma$

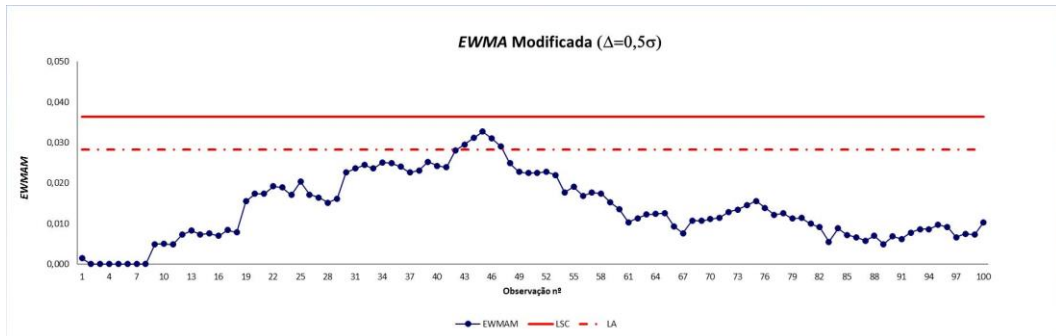


Figura IV.46 Carta EWMA – 2º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

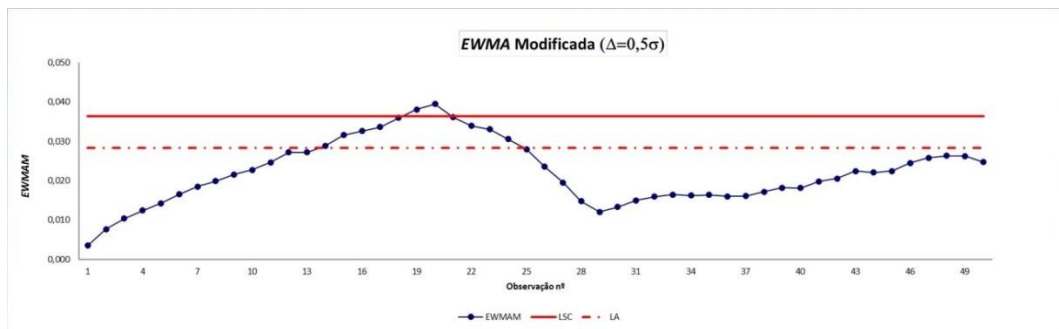


Figura IV.47 Carta EWMA – 3º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

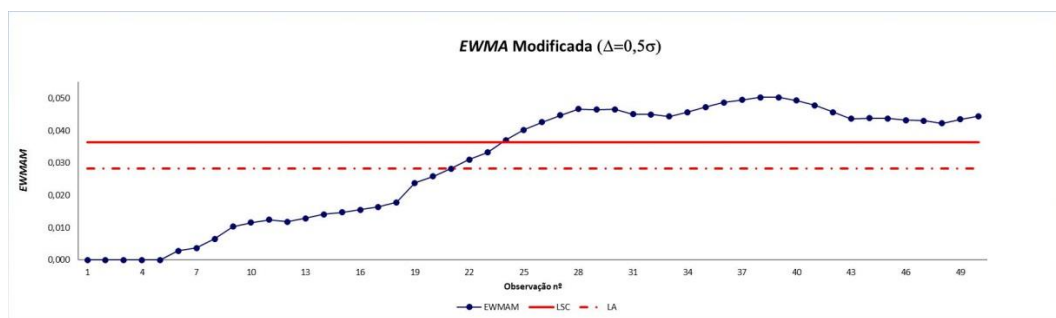


Figura IV.48 Carta EWMA – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

#### IV.1.2.4 Resultados da Var4

##### IV.1.2.4.1 Cartas CUSUMM – Var4

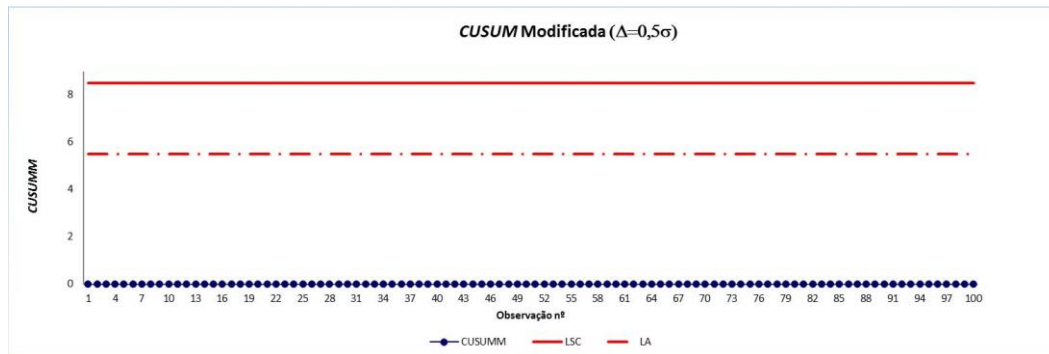


Figura IV.49 Carta CUSUMM – sem avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

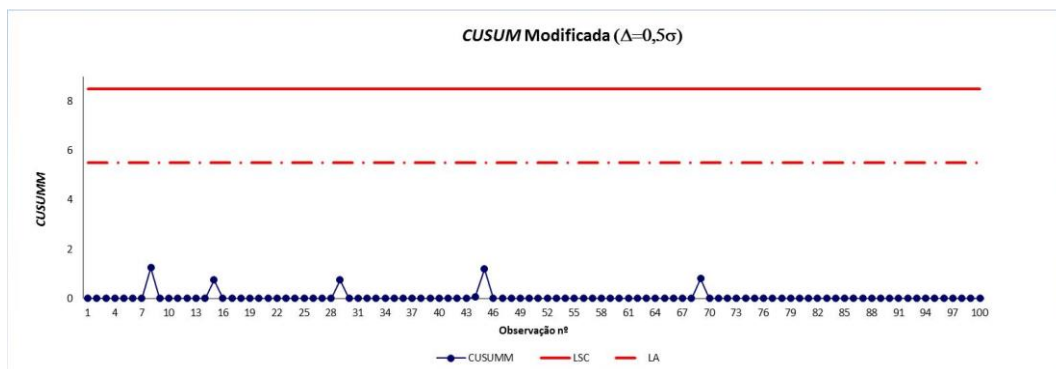


Figura IV.50 Carta CUSUMM – 1º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

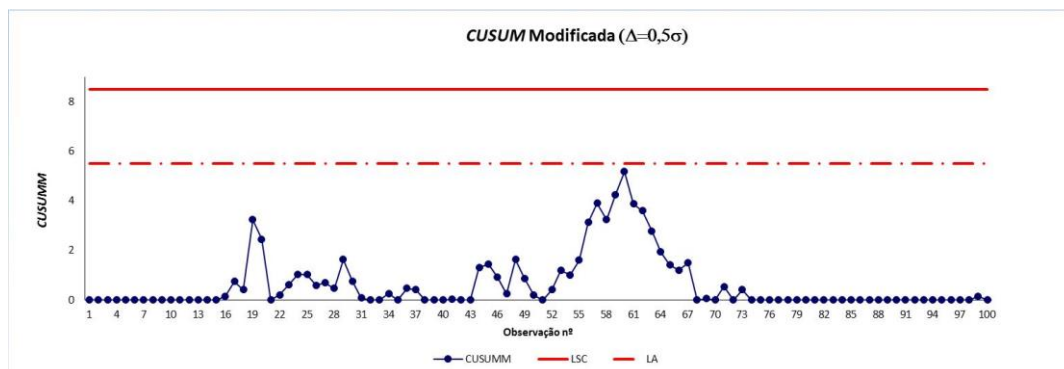


Figura IV.51 Carta CUSUMM – 2º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

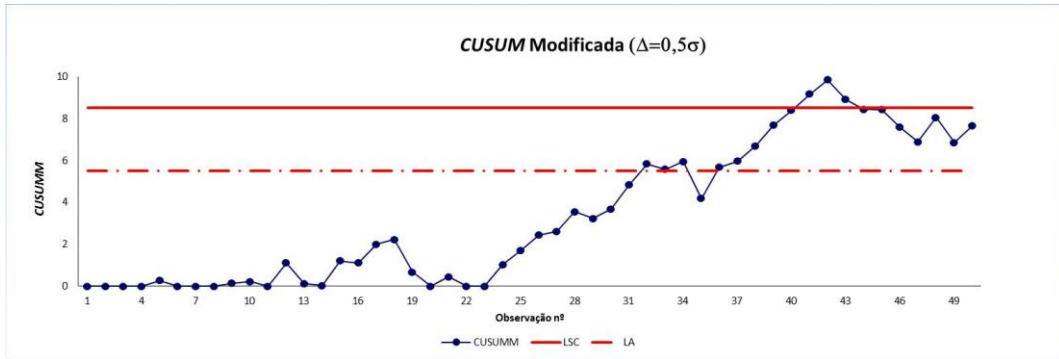


Figura IV.52 Carta CUSUMM – 3º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

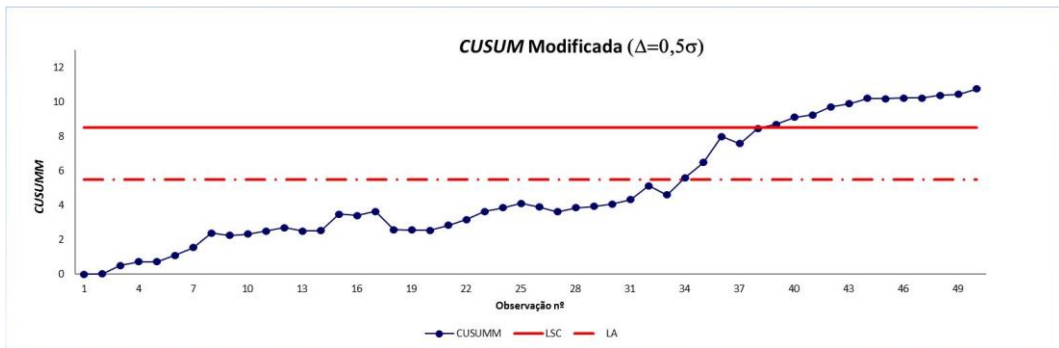


Figura IV.53 Carta CUSUMM – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

**IV.1.2.4.2 Cartas EWMA – Var4**

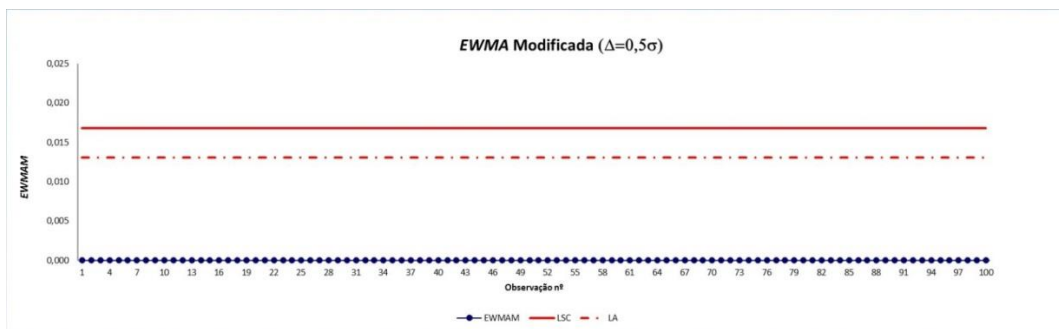


Figura IV.54 Carta EWMA – sem avaria e 1º agravamento para  $\Delta=0,5\sigma$

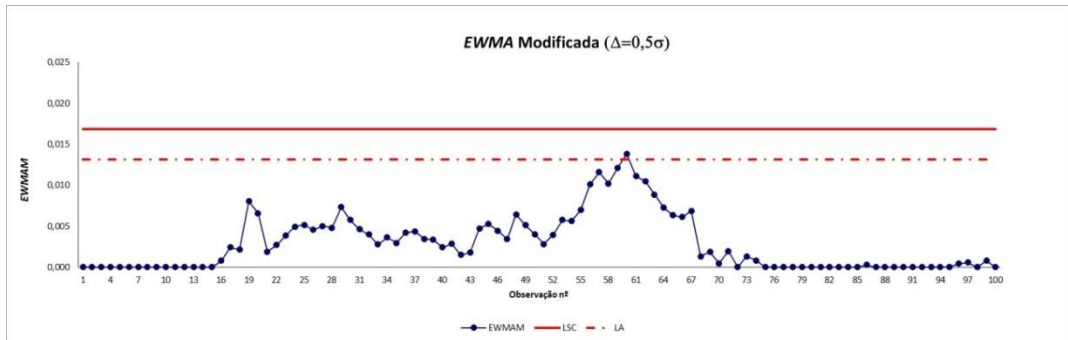


Figura IV.55 Carta EWMA – 2º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

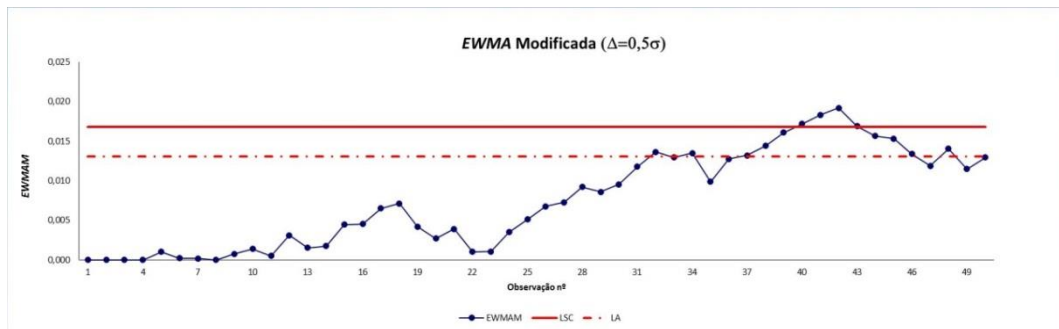


Figura IV.56 Carta EWMA – 3º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

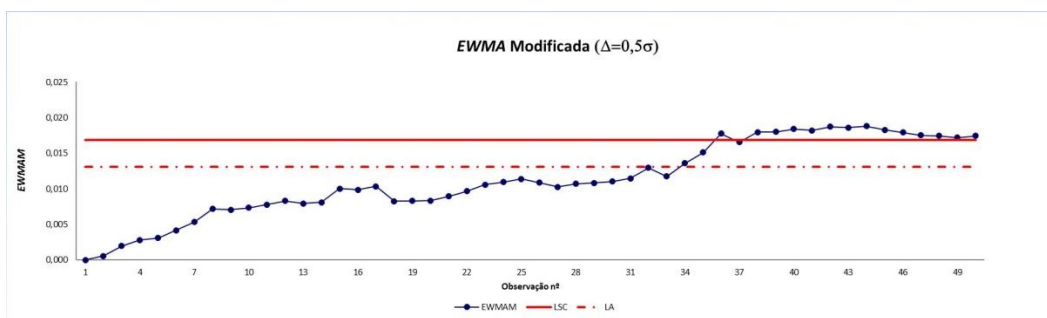


Figura IV.57 Carta EWMA – 4º agravamento da avaria para  $\Delta=0,5\sigma$

## IV.2 Diagnóstico

### IV.2.1 Resultados da Var1

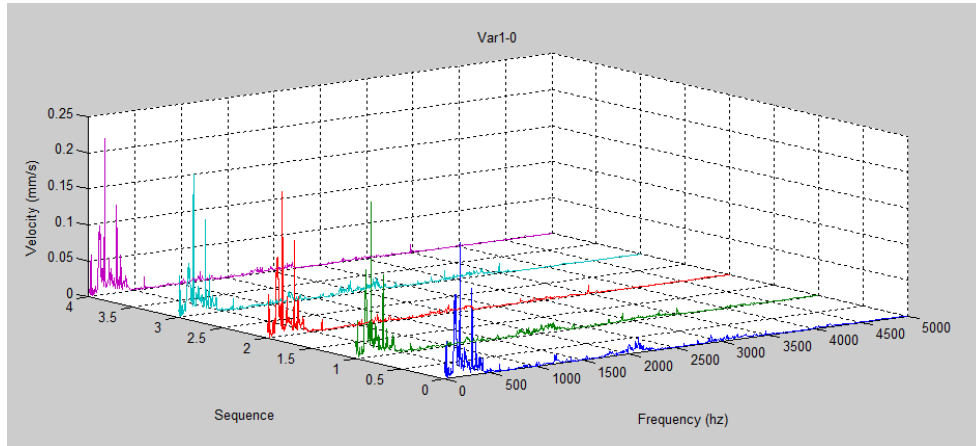


Figura IV.58 Análise espectral - sem avaria

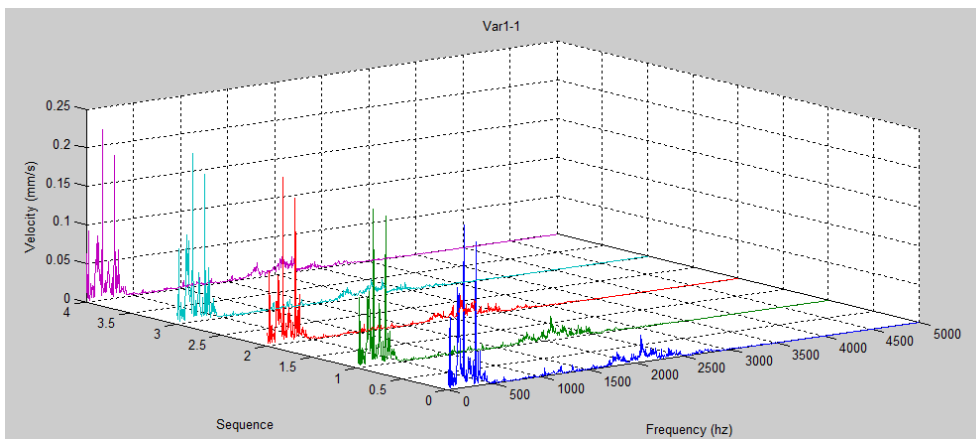


Figura IV.59 Análise espectral - 1º agravamento

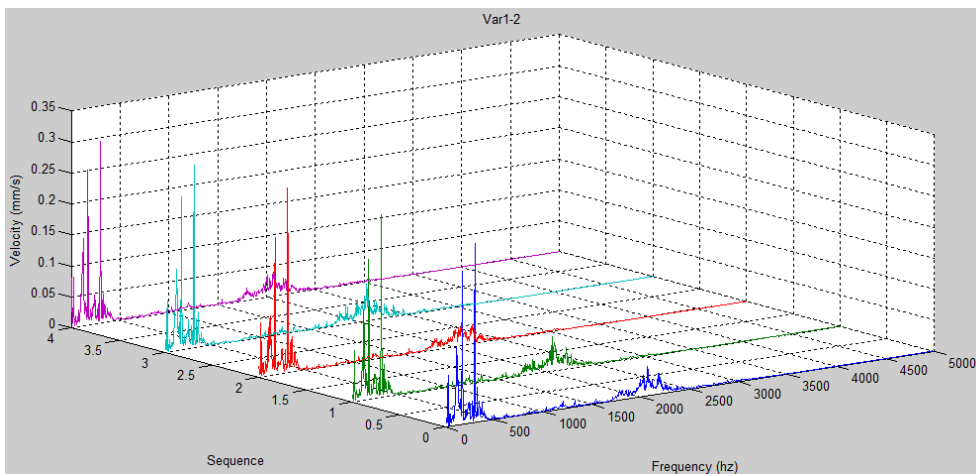


Figura IV.60 Análise espectral - 2º agravamento

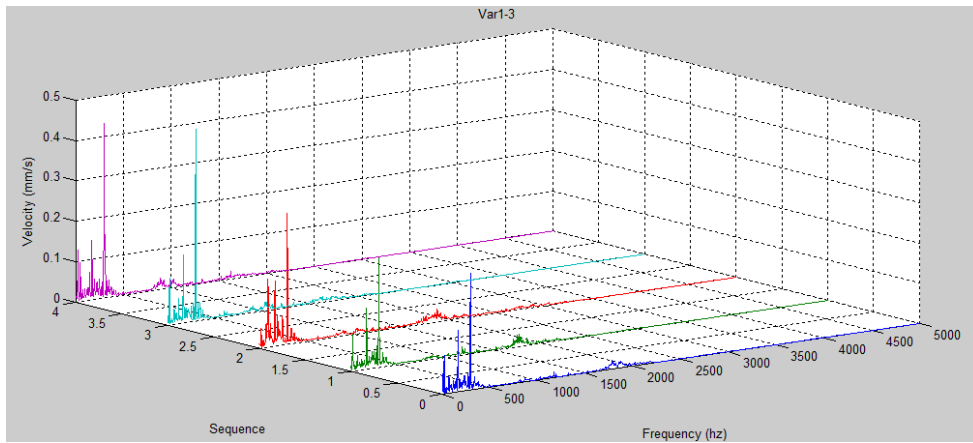


Figura IV.61 Análise espectral - 3º agravamento

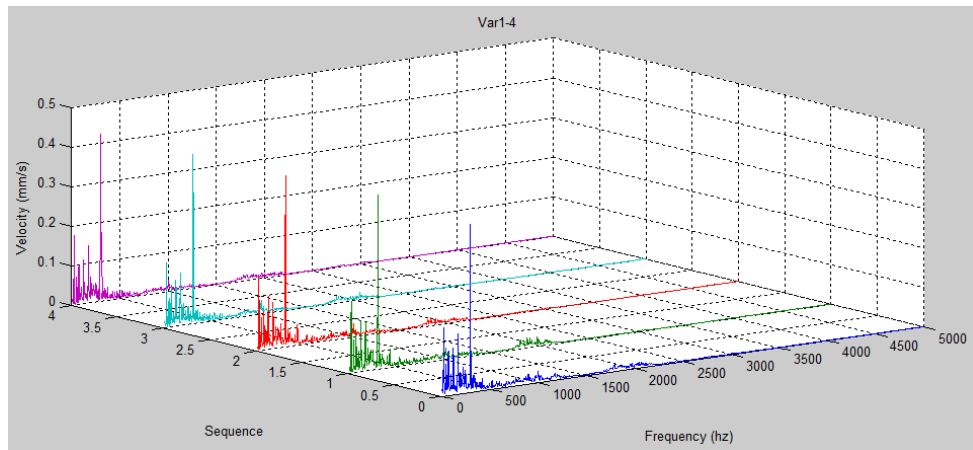


Figura IV.62 Análise espectral - 4º agravamento

### IV.2.2 Resultados da Var3

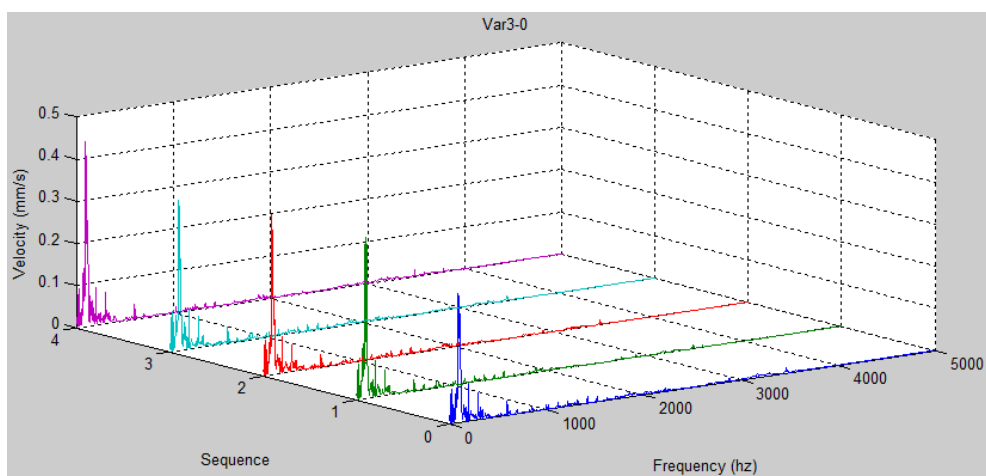


Figura IV.63 Análise espectral - sem avaria

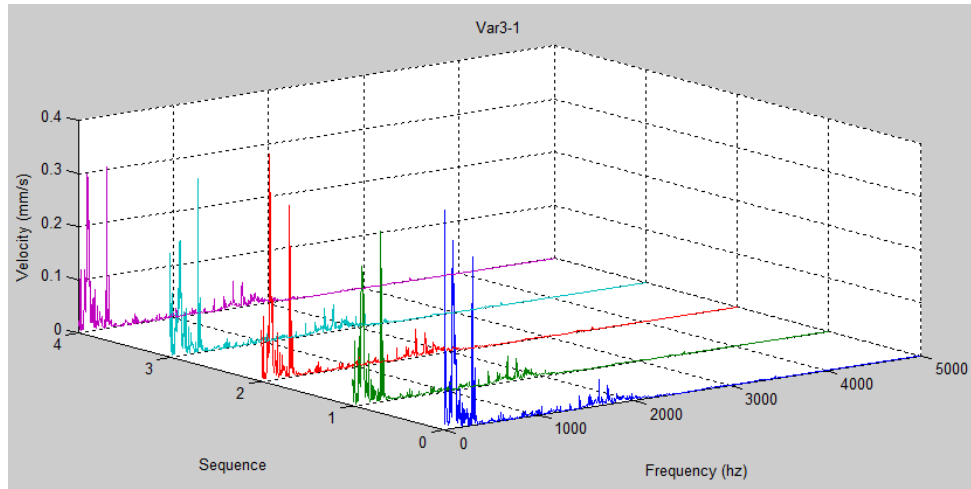


Figura IV.64 Análise espectral - 1º agravamento

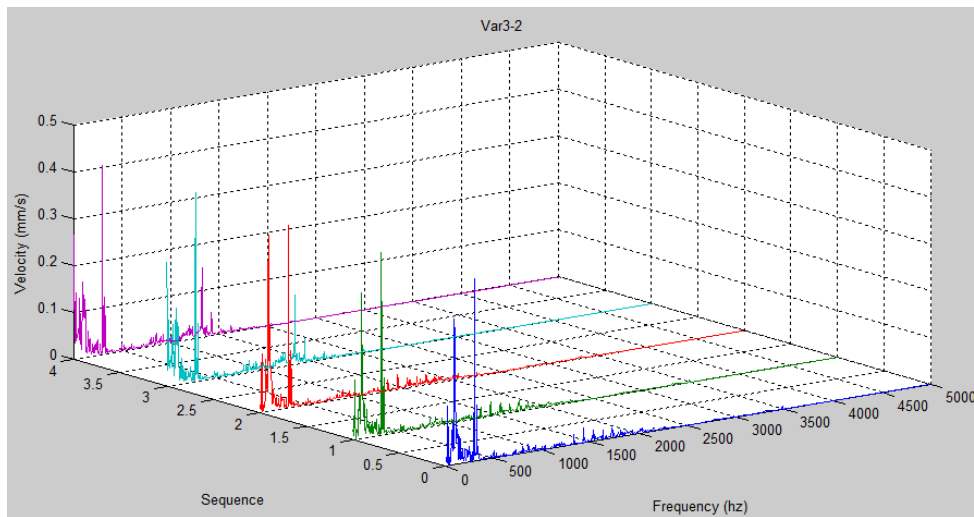


Figura IV.65 Análise espectral - 2º agravamento

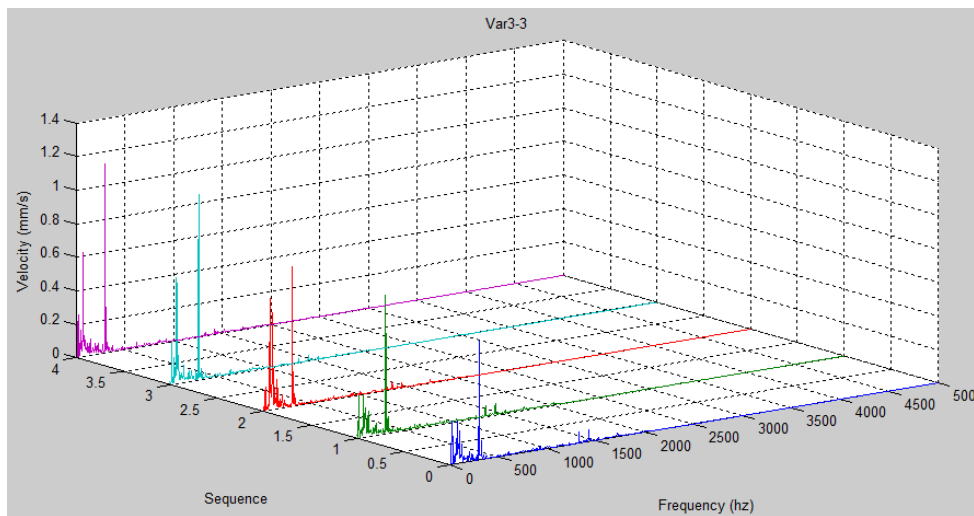


Figura IV.66 Análise espectral - 3º agravamento

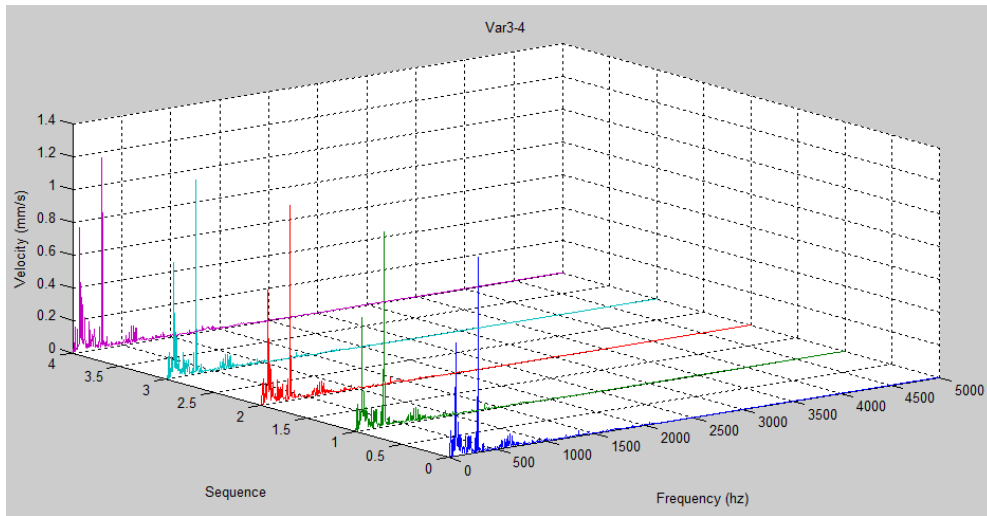


Figura IV.67 Análise espectral - 4º agravamento

### IV.2.3 Resultados da Var4

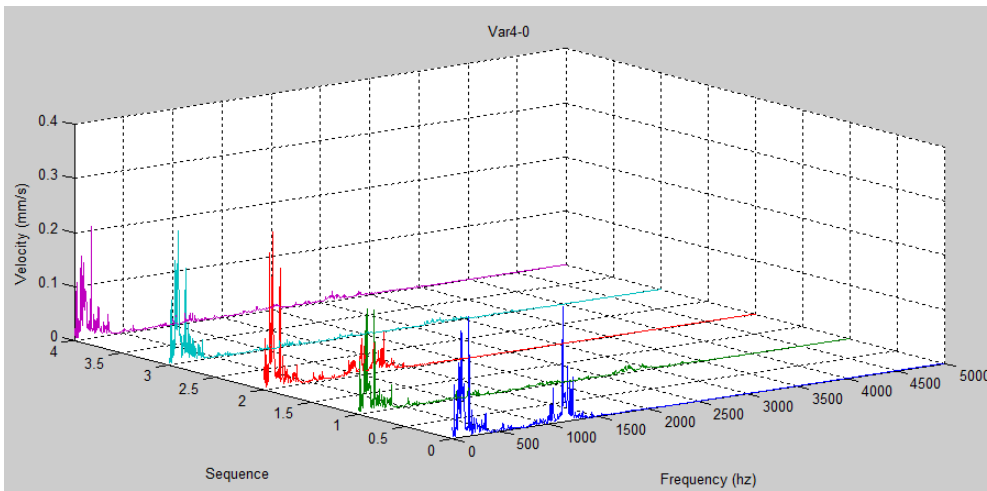


Figura IV.68 Análise espectral - sem avaria

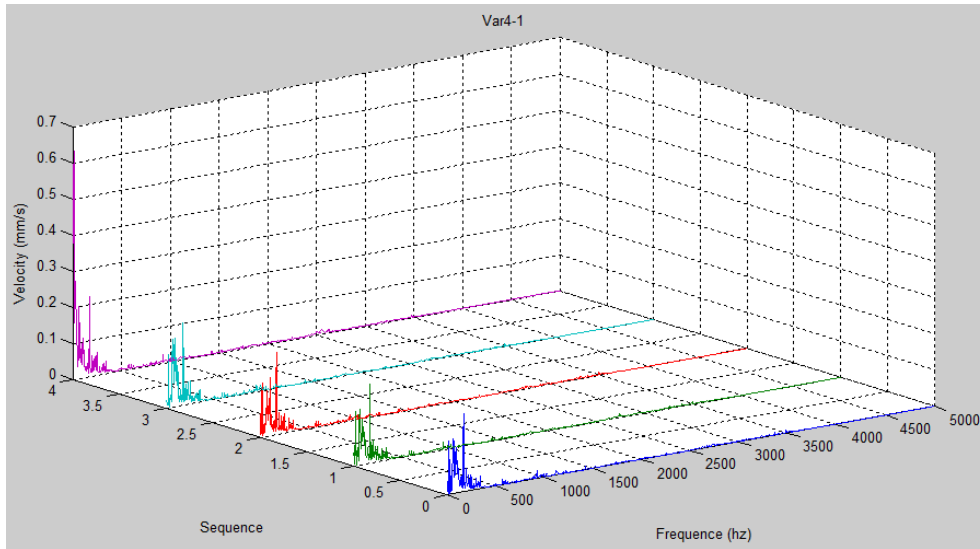


Figura IV.69 Análise espectral - 1º agravamento

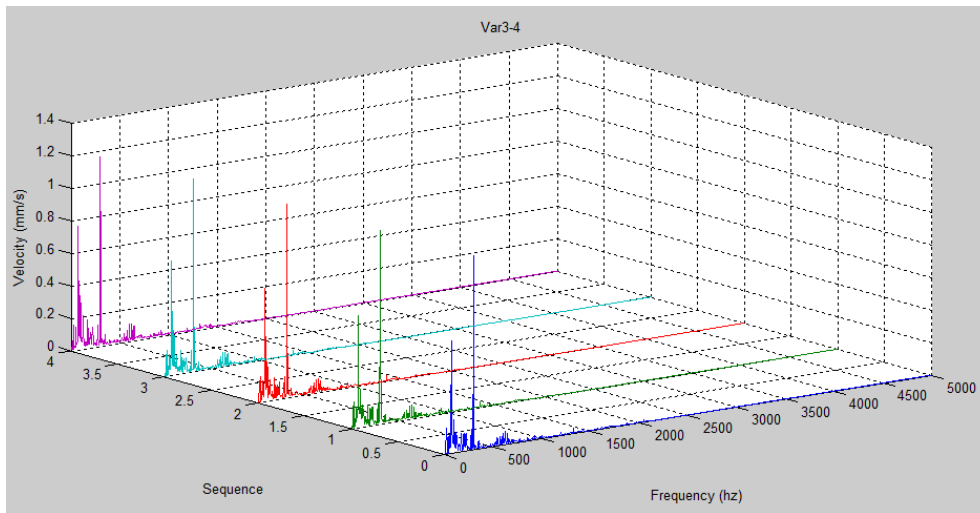


Figura IV.70 Análise espectral - 2º agravamento

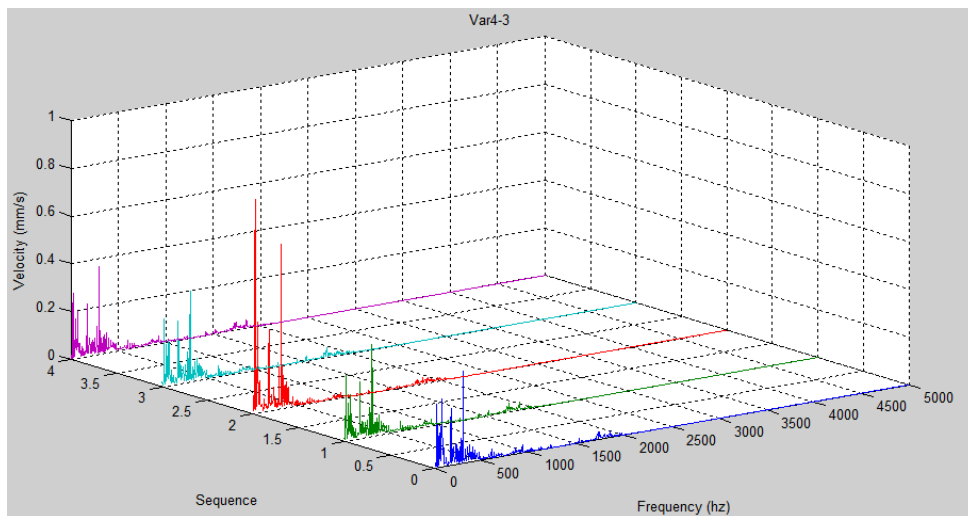


Figura IV.71 Análise espectral - 3º agravamento

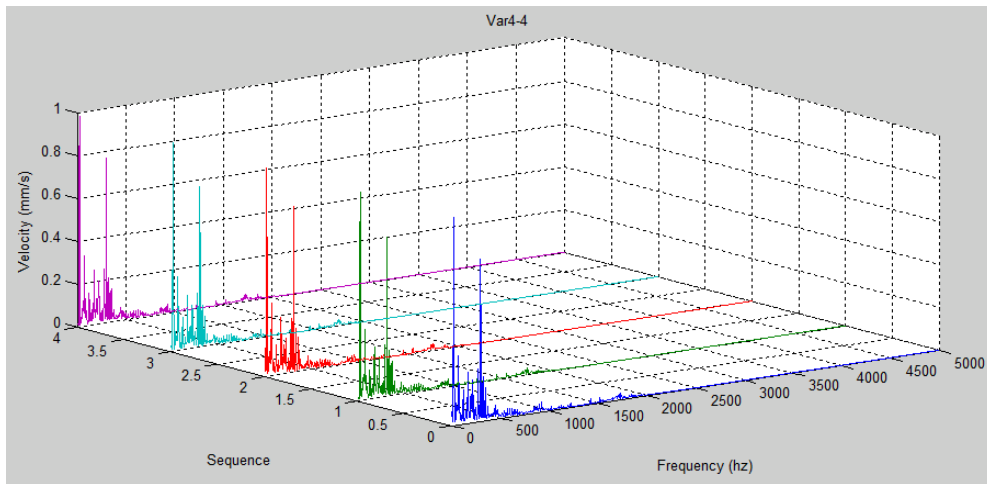


Figura IV.72 Análise espectral - 4º agravamento

## **ANEXO V**

### **COMPLEMENTO DA IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA EM MÁQUINAS PROPULSORAS**



V.1 Turbinas a Gás

As avarias típicas em aero-turbinas de acordo com ISO-13380 (2002) são:

Tabela V.1 Sintomas anomalia vs alteração parâmetros em aero-turbinas

Machine type: Aero gas turbine	Symptom or parameter change												
Fault	Compressor temperature	Compressor press/ press ratio	Air flow	Fuel pressure/ fuel flow	Speed	Gas generator temperature	Pressure/ pressure ratio	Power turbine temperature	Exhaust temperature	Vibration	Oil debris	Oil leakage/ consumption	
Air inlet blockage	*	*	*		*								
Compressor fouled	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
Compressor damaged	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*		
Compressor stall					*		*			*			
Fuel filter blockage		*		*	*		*						
Seal leakage						*	*				*	*	
Combustion chamber holed				*	*			*					
Burner blocked				*	*		*						
Power turbine dirty	*	*	*		*		*	*		*			
Power turbine damage	*	*	*		*		*			*	*		
Bearing wear/ damage										*	*	*	
Gear defects										*	*		
Unbalance										*			
Misalignment										*			

\* Indicates symptom may occur or parameter may change if fault occurs.

V.1.1 Aplicação Univariada das Cartas Short-Run

Carta QM

TG1

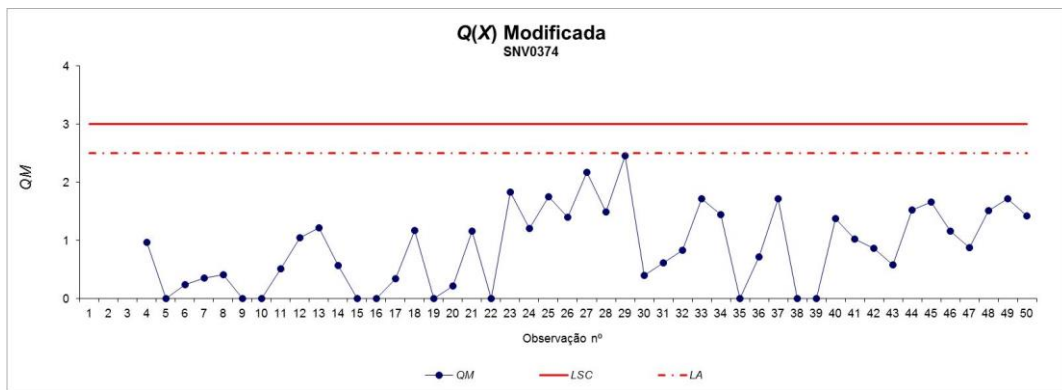
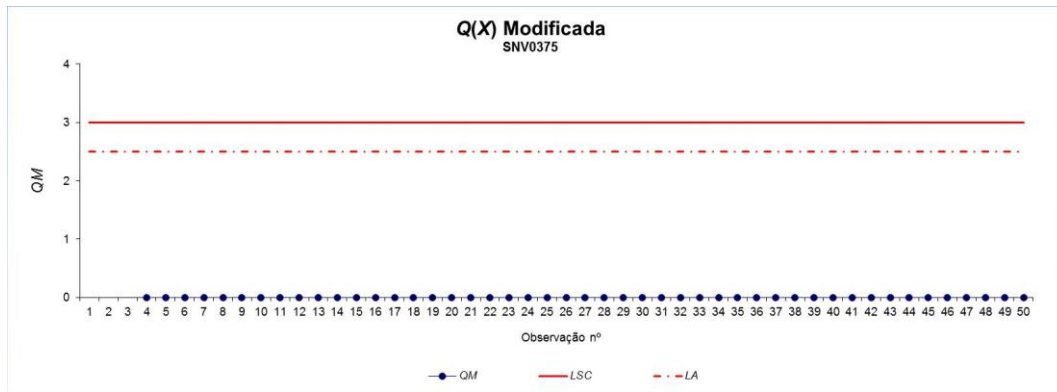
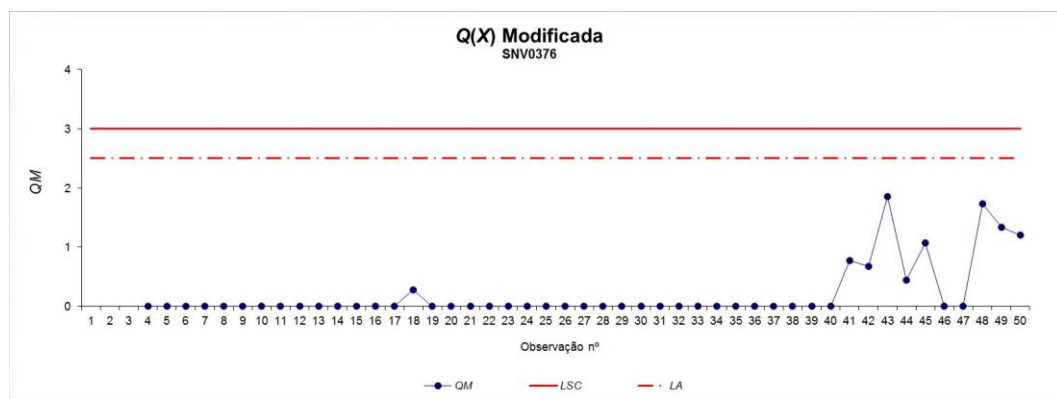
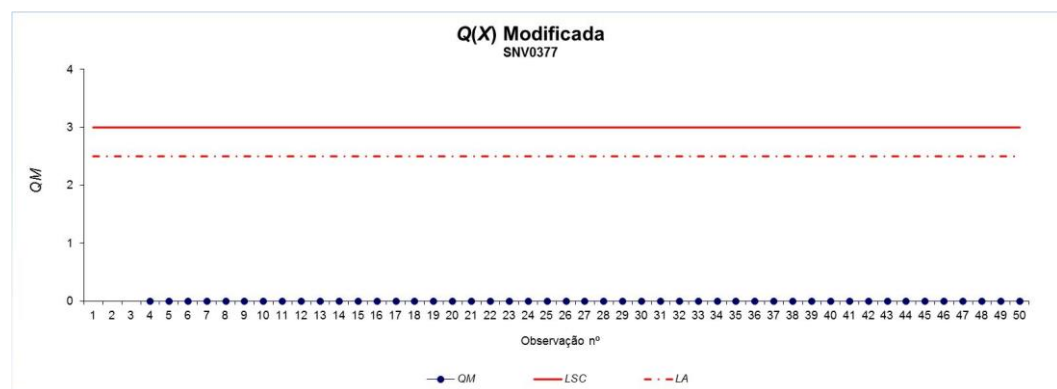


Figura V.1 TG1 - carta QM para sensor SNV0474

Figura V.2 TG1 - carta  $QM$  para sensor SNV0475Figura V.3 TG1 - carta  $QM$  para sensor SNV0476Figura V.4TG1 - carta  $QM$  para sensor SNV0477

### Carta CUSUMOM

#### TG1

Apresenta-se a aplicação da carta  $CUSUMQ$  somente aos sensores SNV0374 e SNV0376 para a TG1, porque tal como na carta  $QM$  não existiram quaisquer valores registados para os restantes

sensores considerados na investigação. E somente para  $k=0.25$ , porque tal como para TG2 é a forma que a carta tem maior sensibilidade.

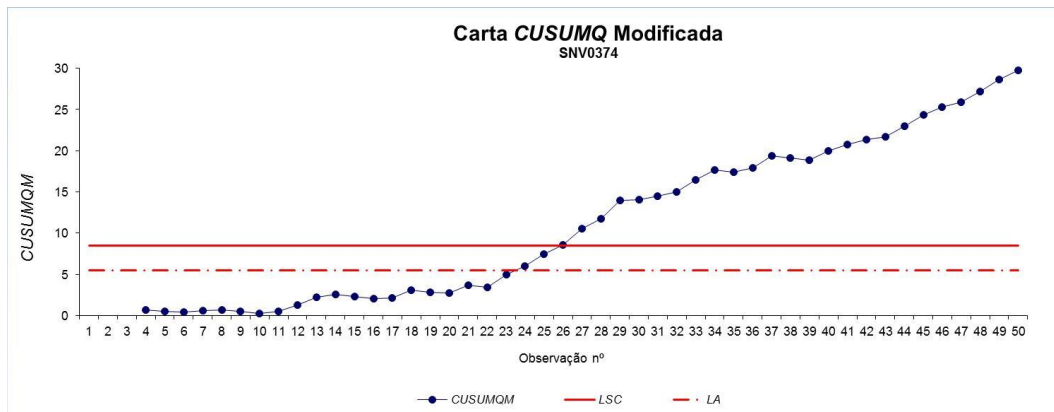


Figura V.5 TG1 - carta *CUSUMQM* para sensor SNV0374

Verifica-se que estas cartas têm sensibilidade elevada, e por isso, apesar dos resultados obtidos nas figuras VI.5 e VI.6, sabe-se que esta turbina não necessitava de intervenção.

Aumentado o valor de  $k$ , a carta perde a sua sensibilidade e torna os resultados mais reais. Este resultado, que se trata, de um falso alarme pode acontecer neste tipo de cartas cumulativas, pelo que as cartas *QM* apresentam um resultado mais confiável.

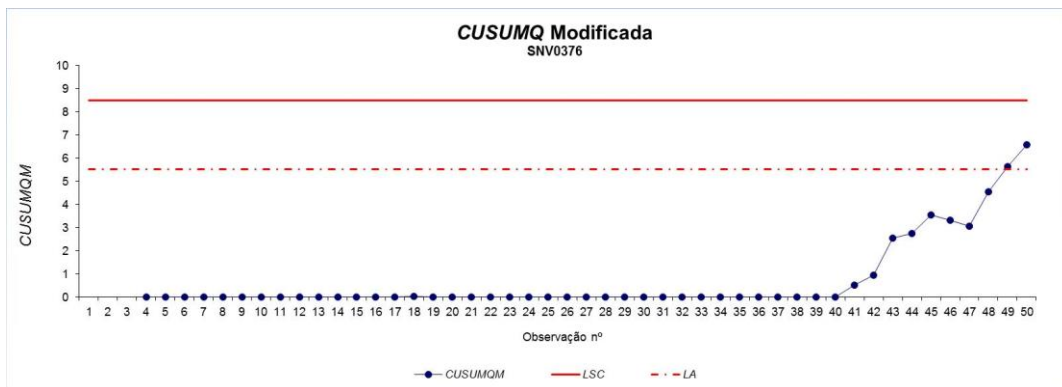


Figura V.6 carta *CUSUMQM* para sensor SNV0376

## TG2

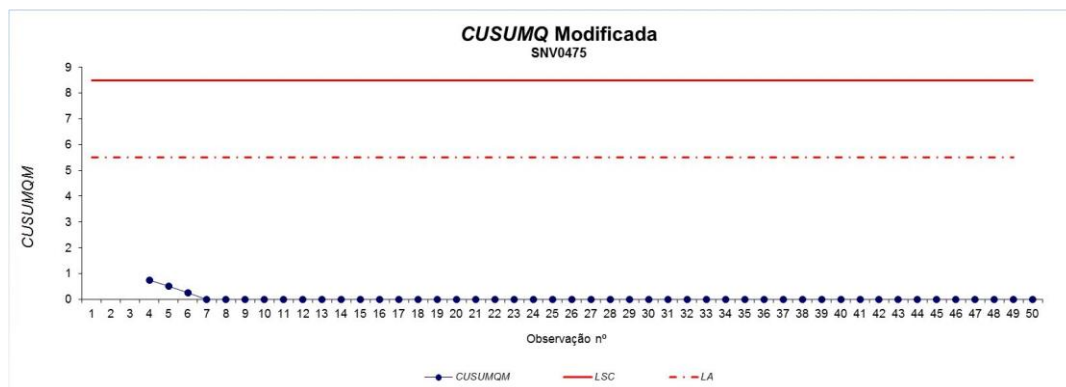


Figura V.7 TG2 - carta *CUSUMQM* para sensor SNV0475

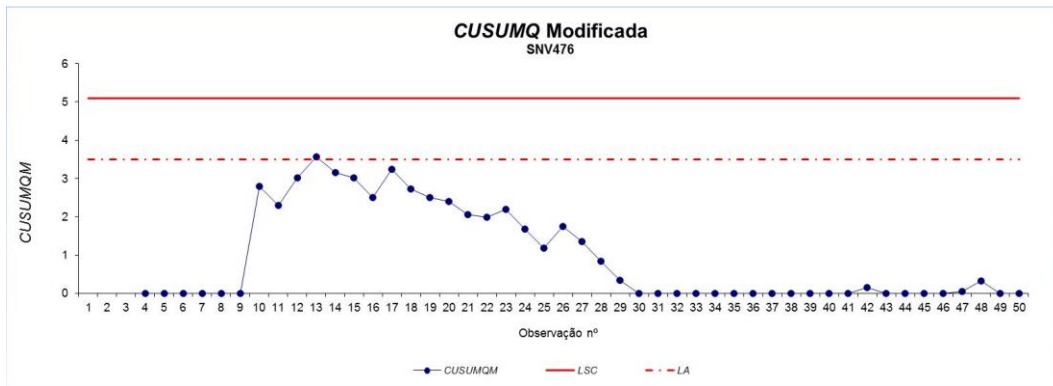


Figura V.8 TG2 - carta *CUSUMQM* para sensor SNV0476 para  $k=0,5$

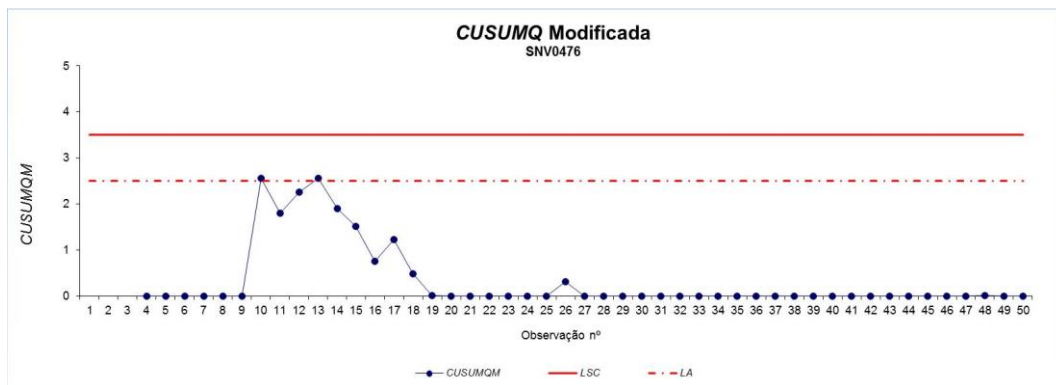


Figura V.9 TG2 - carta *CUSUMQM* para sensor SNV0476 para  $k=0,75$

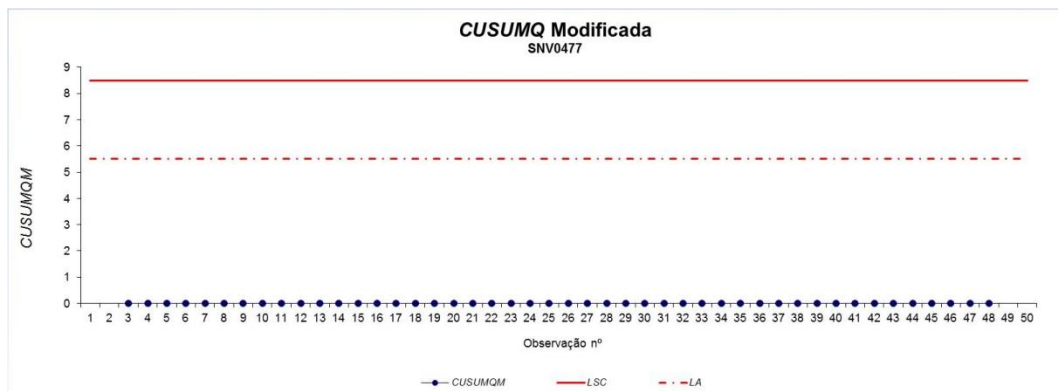


Figura V.10 TG2 - carta *CUSUMQM* para sensor SNV0477

**Carta EWMAQM**

**TG1**

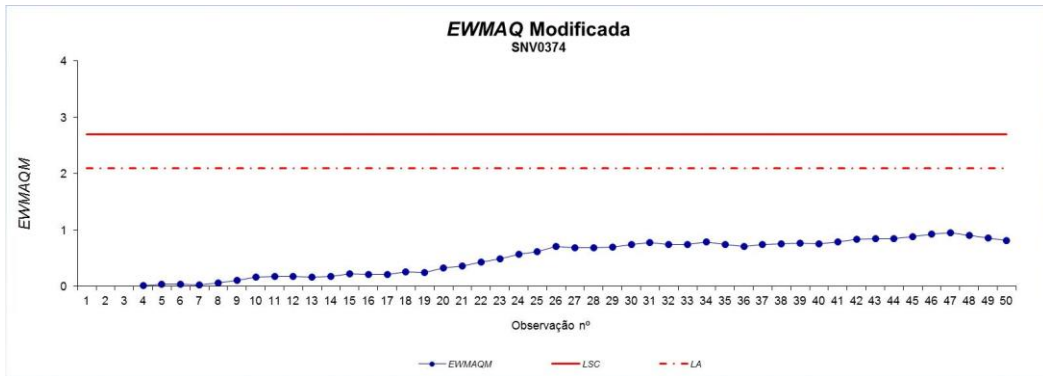


Figura V.11 TG1 - carta EWMAQM para sensor SNV0374 para  $\lambda=0,05$

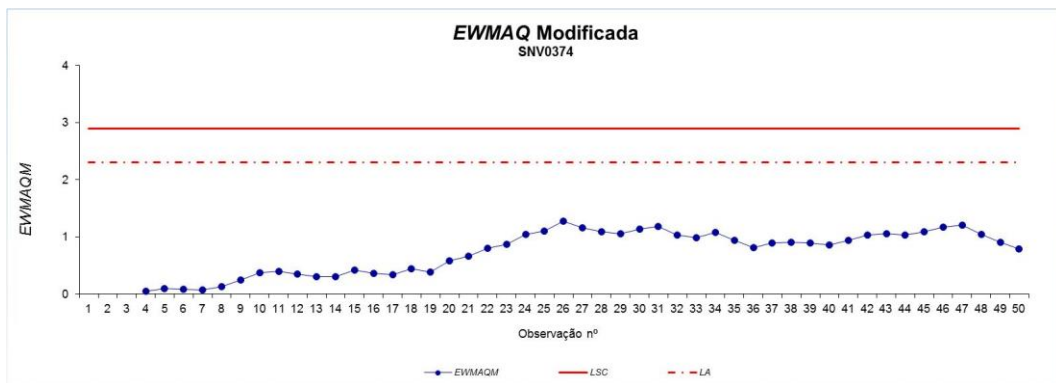


Figura V.12 TG1 - carta EWMAQM para sensor SNV0374 para  $\lambda=0,13$

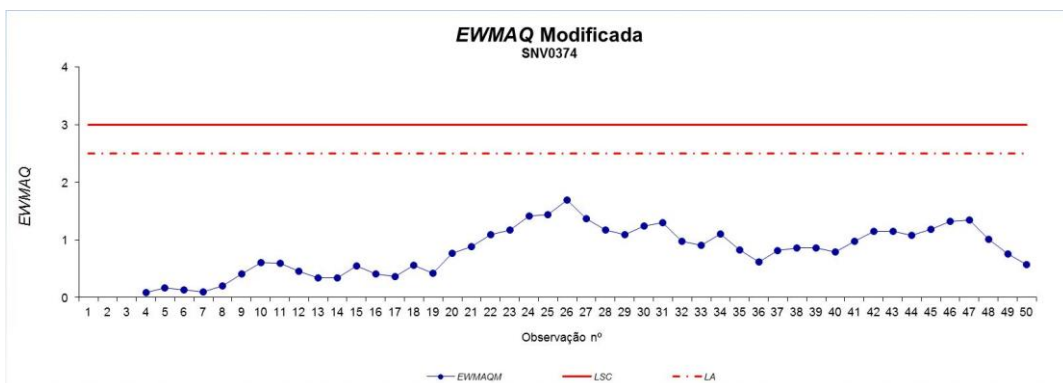


Figura V.13 TG1 - carta EWMAQM para sensor SNV0374 para  $\lambda=0,25$

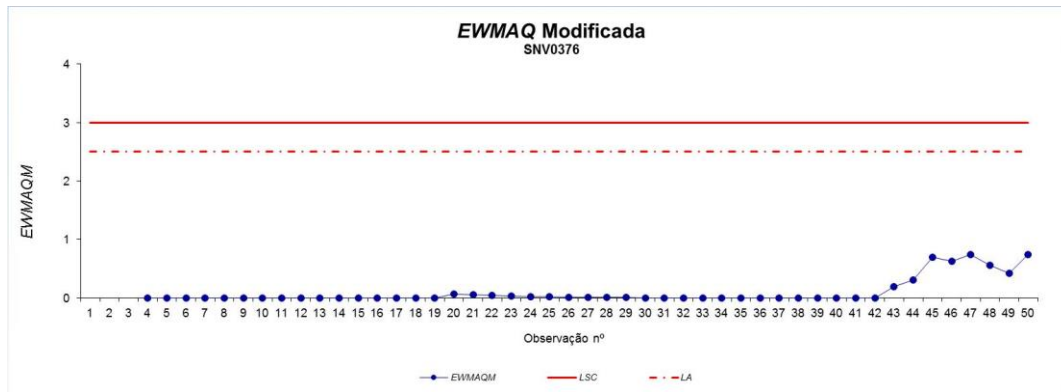


Figura V.14 TG1 - carta *EWMAQM* para sensor SNV0376 para  $\lambda=0,25$

**TG2**

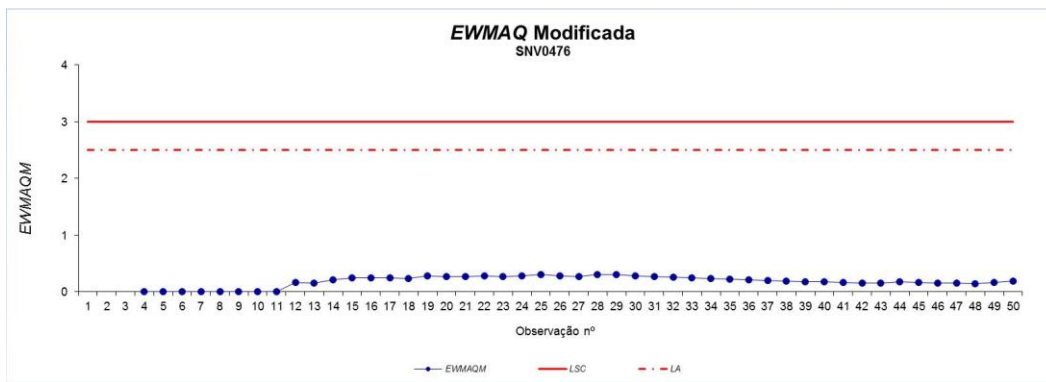


Figura V.15 TG2 - carta *EWMAQM* para sensor SNV0374 para  $\lambda=0,05$

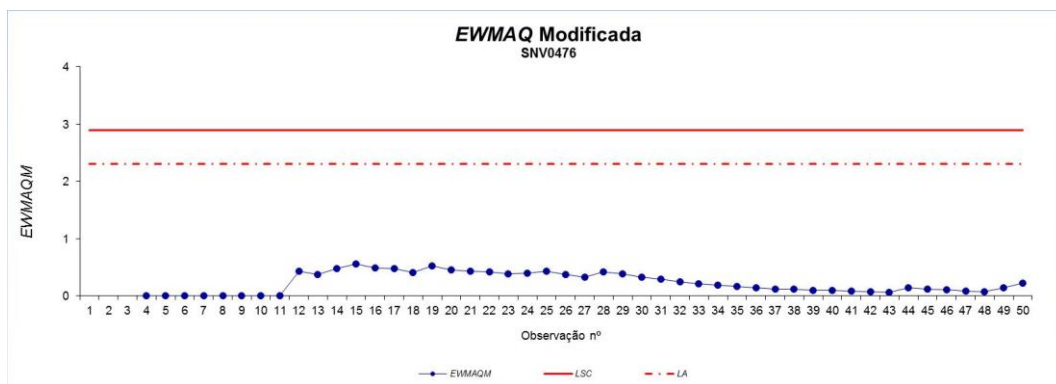


Figura V.16 TG2 - carta *EWMAQM* para sensor SNV0376 para  $\lambda=0,13$

V.1.2 Aplicação Multivariada das Cartas Short Run

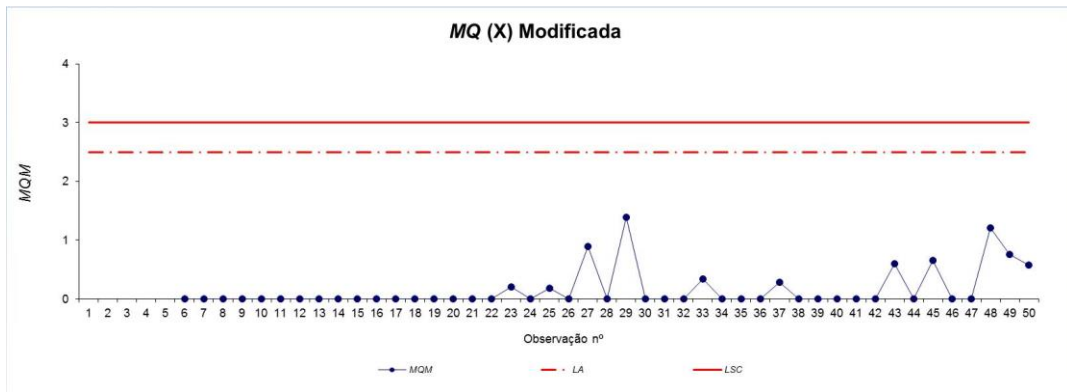


Figura V.17 TG1 - carta MQM para TG1

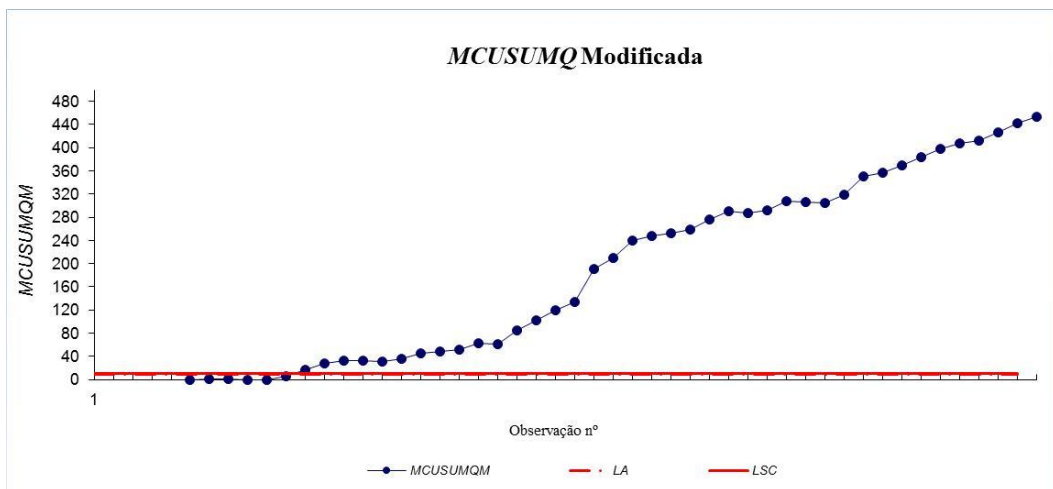


Figura V.18 Carta MCUSUMQM para TG1

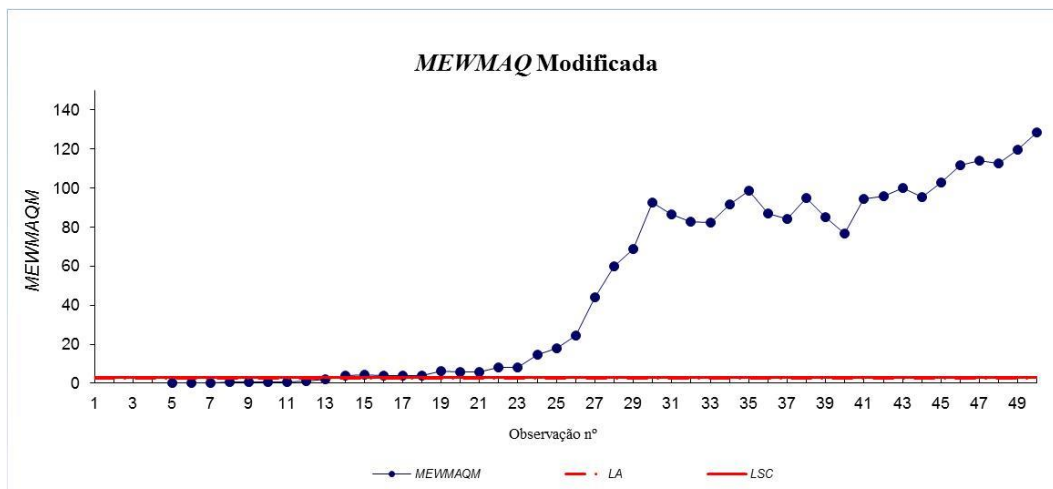


Figura V.19 Carta MEWMAQM para TG1

## V.2 Motores Diesel

Avárias típicas em motores de combustão interna de acordo com ISO-13380 (2002) as contantes na Tabela V.2.

Tabela V.2 Sintomas anomalia vs alteração parâmetros em motores de combustão interna

Machine type: RIC engine	Symptom or parameter change											
Fault	Engine temperature	Cylinder pressure	Air flow	Fuel pressure	Fuel flow	Exhaust temperature	Exhaust pressure	Vibration	Output Power	Oil Consumption	Oil debris	Cooling fluid leak
Air inlet blockage	*	*	*				*					
Fuel injector fault	*	*	*		*	*		*	*	*		
Ignition fault	*	*			*	*		*	*	*		
Bearing wear								*			*	
Fuel filter blockage				*	*		*					
Seal leakage						*	*			*		
Piston ring fault		*							*	*	*	
Cooling system fault					*		*			*	*	*
Secondary balance gear fault								*				
Gear Defects								*			*	
Flywheel damage								*			*	
Mounting fault								*				
Unbalance								*				
Misalignment								*				

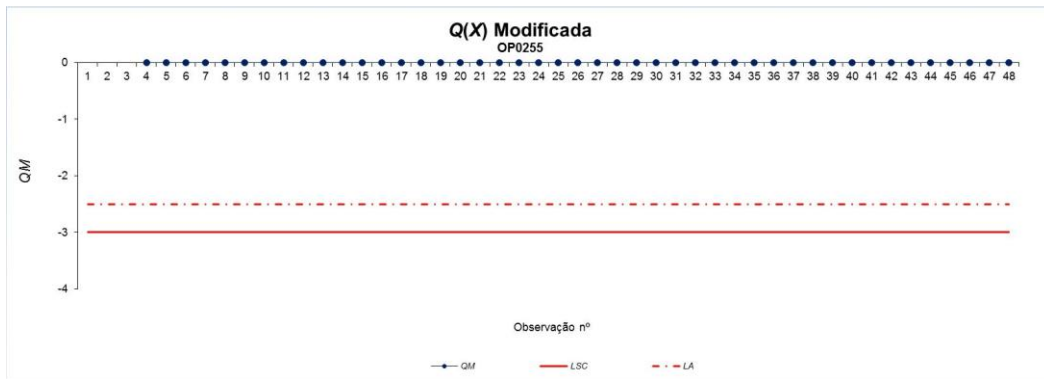
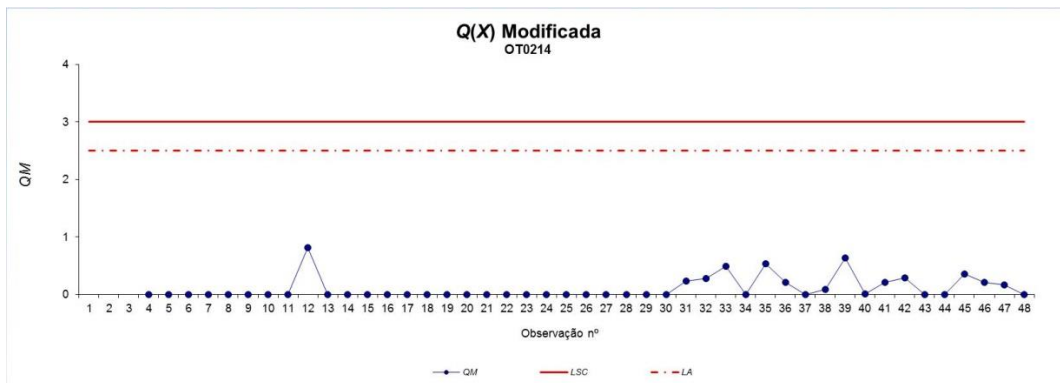
\* Indicates symptom may occur or parameter may change if fault occurs.

### V.2.1 Aplicação Univariada das Cartas Short-Run

#### Carta QM

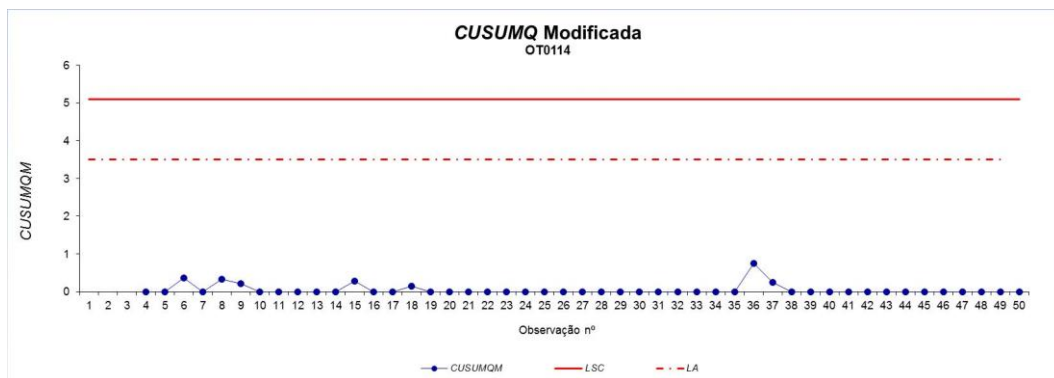
#### MD2

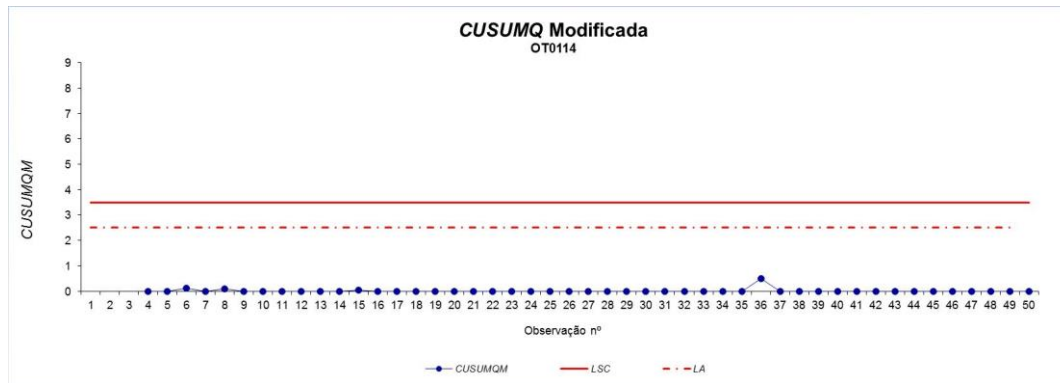
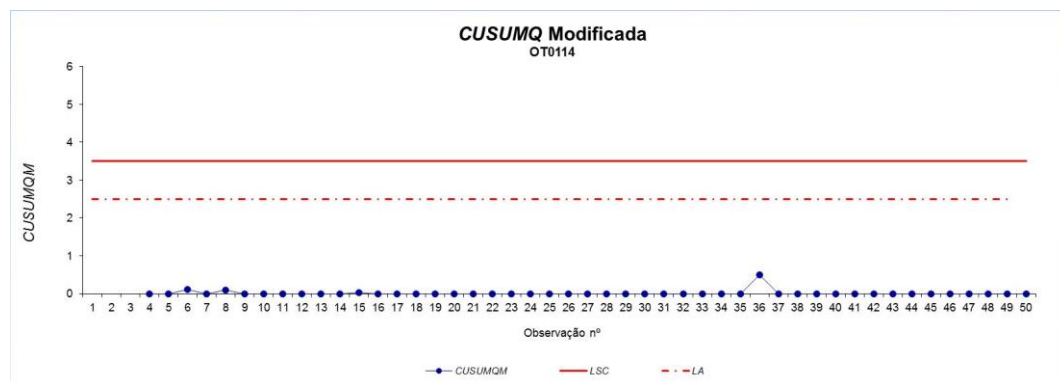
De referir que os sensores OP0155, OP0157 e FP0163, não registam qualquer valor pelo que os dois últimos não se representam aqui.

Figura V.20 MD2 - carta  $QM$  para sensor OP0255Figura V.21 MD2 - carta  $QM$  para sensor OT0214

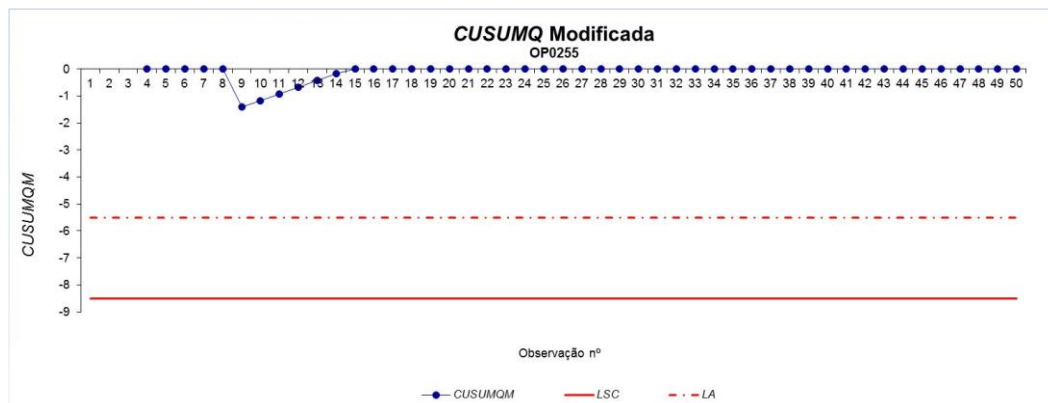
### Carta CUSUMQM

#### MD1

Figura V.22 MD1 - carta  $CUSUMQM$  para sensor OT0114 com  $k=0,5$

Figura V.23 MD1 - Carta *CUSUMQM* para sensor OT0114 com  $k=0,75$ Figura V.24 MD1 - carta *CUSUMQM* para sensor OT0114 com  $k=1$ **MD2**

Para os sensores da carta *CUSUMQM* do MD2 somente se representa uma carta de cada um por ser aquela que tem maior sensibilidade, o  $k=0,25$ . Para FP0163 não se representa a carta porque não é registado qualquer valor.

Figura V.25 MD2 - carta *CUSUMQM* para sensor SNV0475 com  $k=0,25$

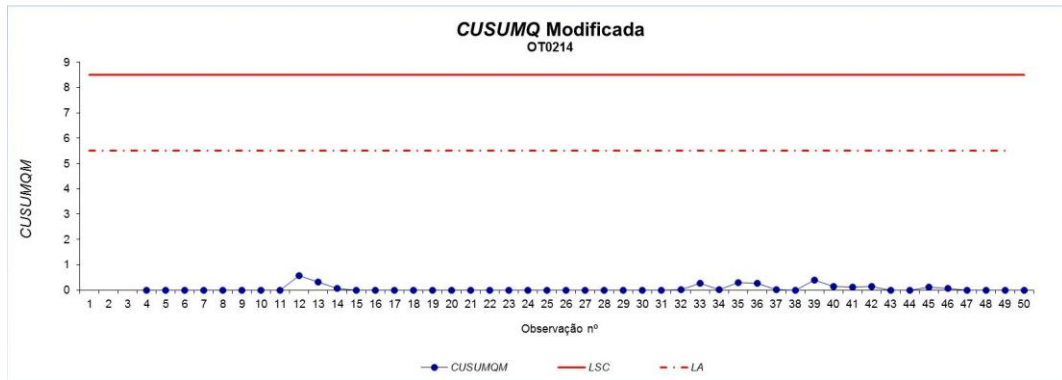


Figura V.26 MD2 - carta  $CUSUMQM$  para sensor OT0214 com  $k=0,25$

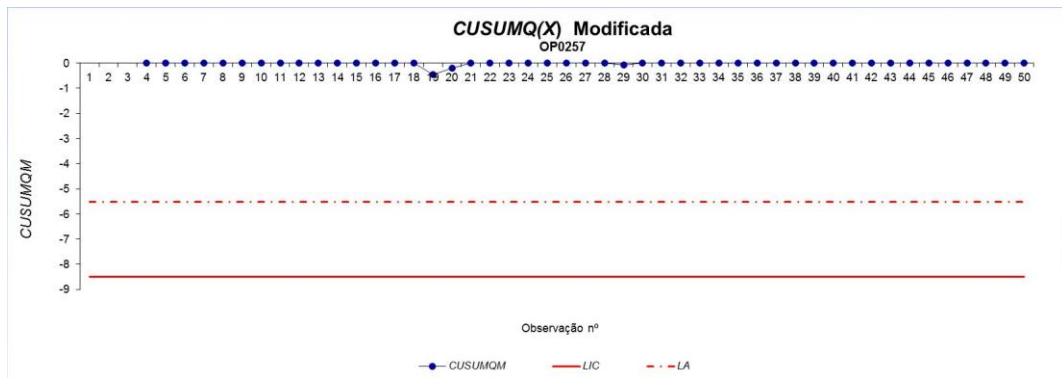


Figura V.27 MD2 - carta  $CUSUMQM$  para sensor OP0257 com  $k=0,25$

### Carta EWMAQM

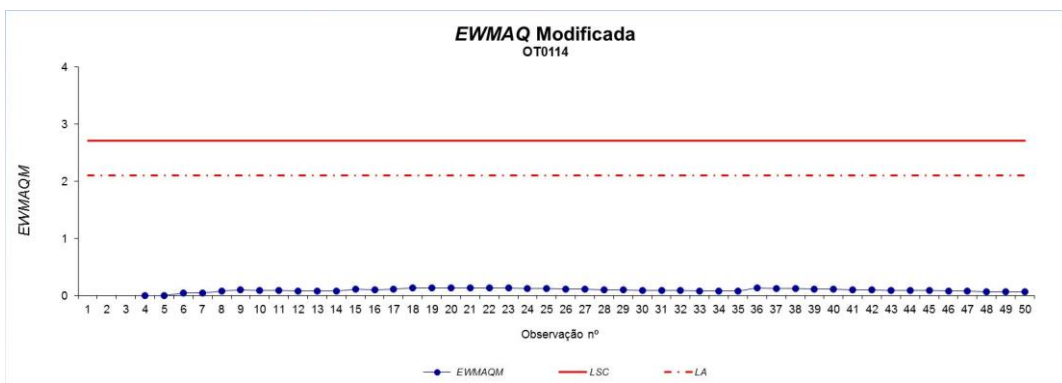


Figura V.28 MD1 - carta  $EWMAQM$  para sensor OP0114 com  $\lambda=0,05$

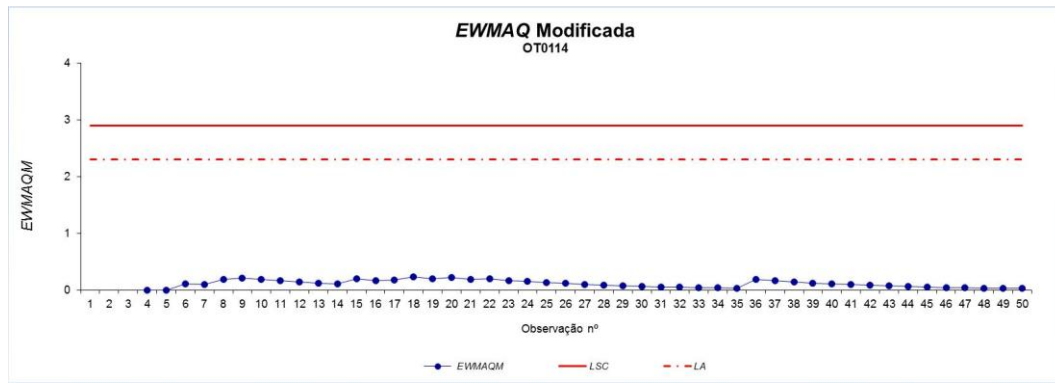


Figura V.29 MD1 - carta *EWMAQM* para sensor OT0114 com  $\lambda=0,13$

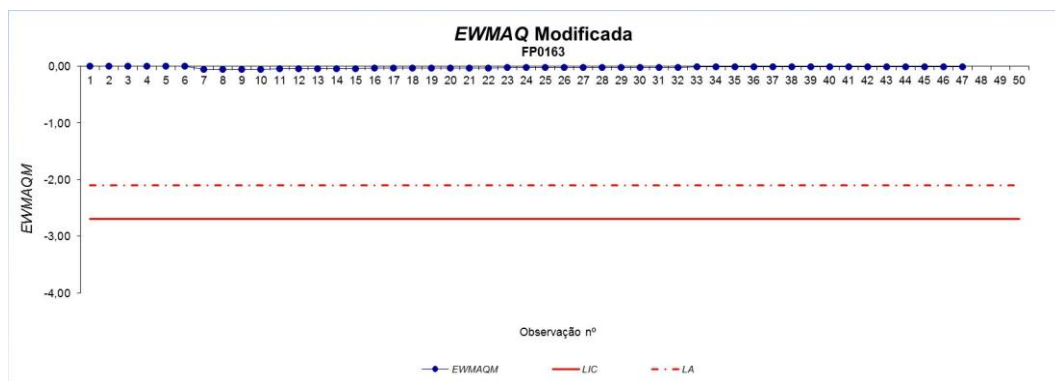


Figura V.30 MD1 - carta *EWMAQM* para sensor FP0163 com  $\lambda=0,05$

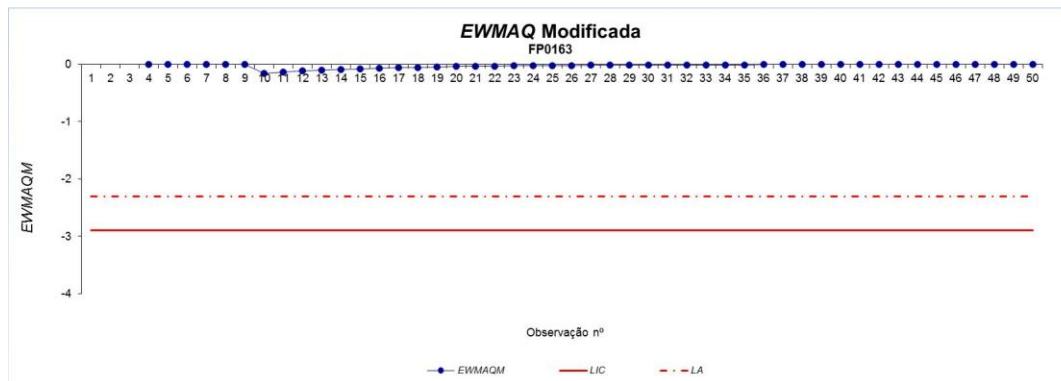


Figura V.31 MD1 - carta *EWMAQM* para sensor FP0163 com  $\lambda=0,13$

## MD2

Para os sensores da carta *EWMAQM* do MD2 somente se representa três cartas para um mesmo sensor OT0214, porque é o único que registra valores para este motor e para este tipo de carta.

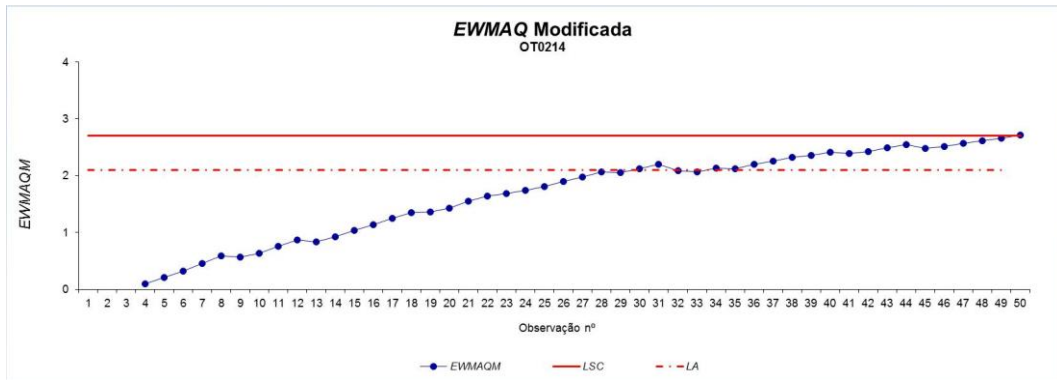


Figura V.32 MD1 - carta EWMAQM para sensor OP0214 com  $\lambda = 0,05$

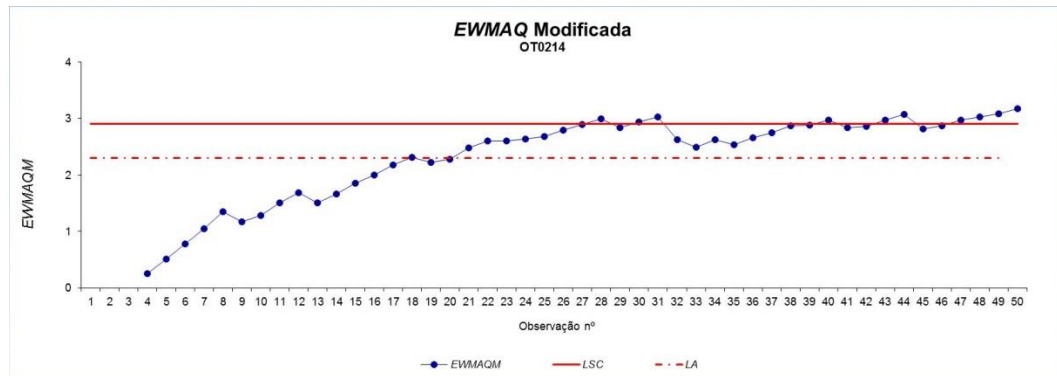


Figura V.33 MD1 - carta EWMAQM para sensor OP0214 com  $\lambda = 0,13$

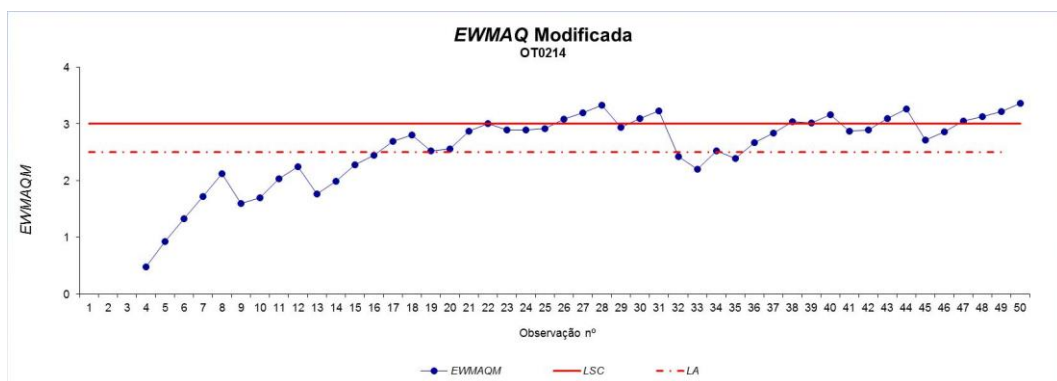


Figura V.34 MD1 - carta EWMAQM para sensor OP0214 com  $\lambda = 0,25$

## V.2.2 Aplicação Multivariada das Cartas Short Run

### Carta MQM

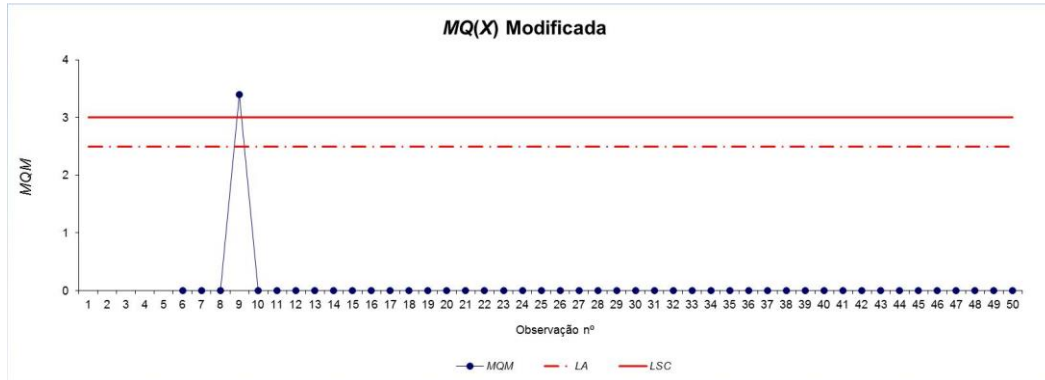


Figura V.35 MD2 - carta MQM para sensor OP0214 com  $\lambda = 0,25$

### Carta MCUSUMQM

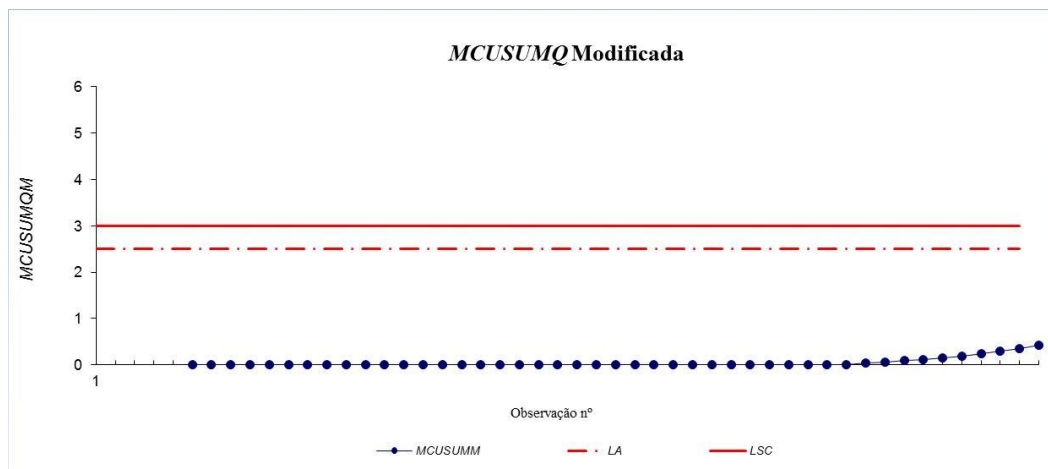


Figura V.36 MD2 - carta MCUSUMQM para sensor OP0214 com  $\lambda = 0,25$

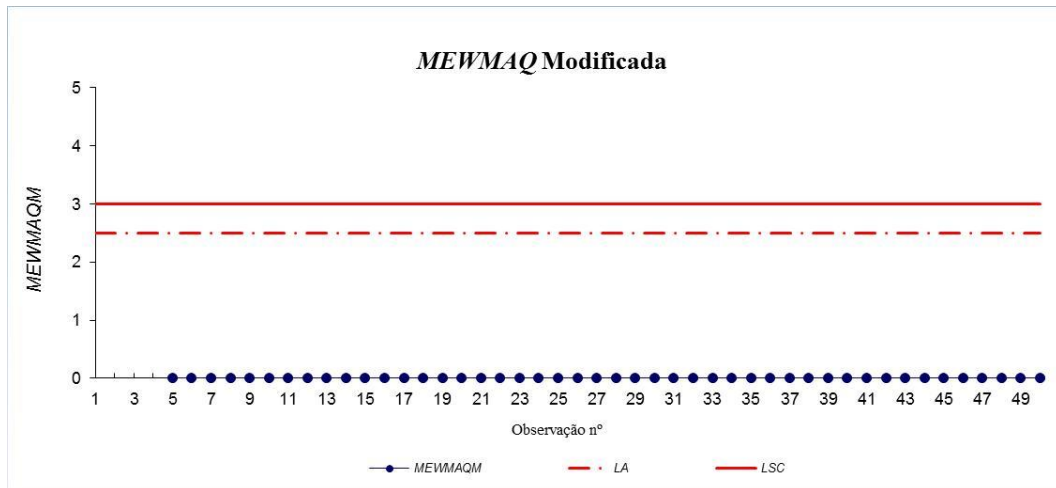
**Carta MEWMAQM**

Figura V.37 MD2 - carta *MEWMAQM* para sensor OP0214 com  $\lambda = 0,25$

**V.2.3 Aplicação Cartas para amostras grandes com Simulação dados**

Apresentam-se aqui as cartas de controlo  $T^2M$  e  $MCUSUMM$  e  $MEWMAM$  para os agravamentos 0, 1 e 2. Na tabela V.3 apresentam-se os valores da média e do desvio padrão que geraram valores no *MATLAB* para o 0, 1º e 2º agravamento.

Tabela V.3 Valores da média e desvio padrão

	Média, $\mu$	Desvio Padrão, $\sigma$
TG101	93,11	0,1
TG102	93,34	0,1
TG103	90,63	0,1
TG104	73,88	0,1
TG111	99,11	0,5
TG112	99,34	0,5
TG113	96,63	0,5
TG114	79,88	0,5
TG121	100,11	0,5
TG122	100,34	0,5
TG123	97,63	0,5
TG124	80,88	0,5

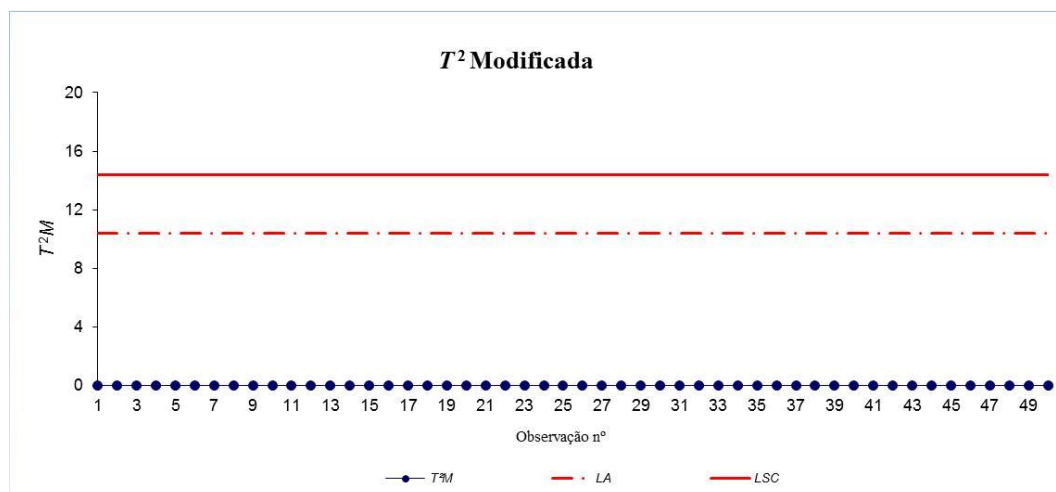
**$T^2$  Modificada**

Figura V.38 Fase 2 - 0 agravamento da avaria - simulação

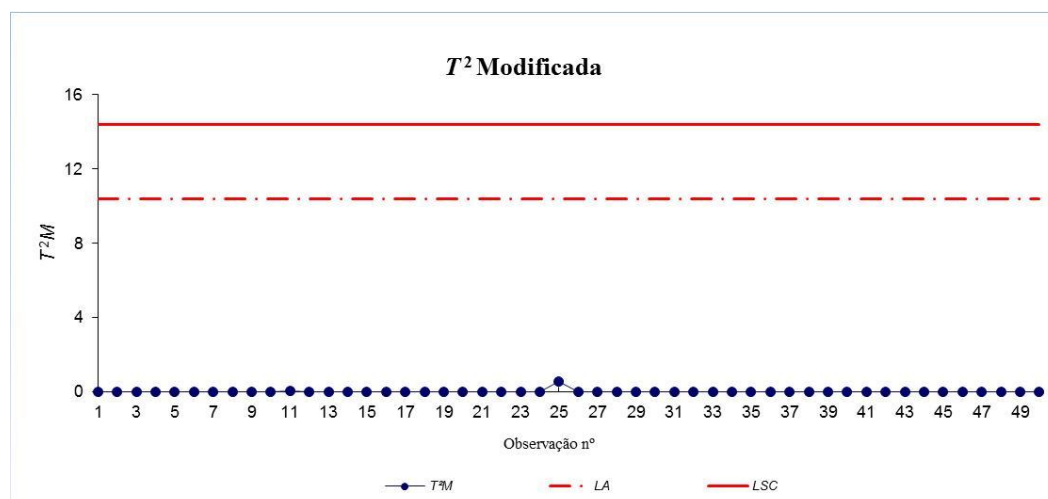


Figura V.39 Fase 2 - 1º agravamento da avaria - simulação

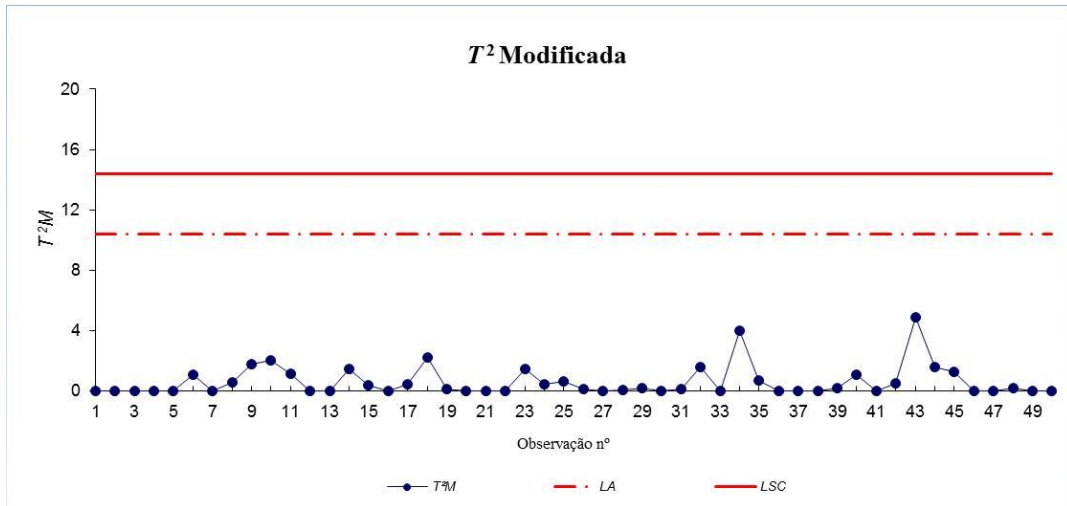


Figura V.40 Fase 2 - 2º agravamento da avaria - simulação

**MCUSUMM**

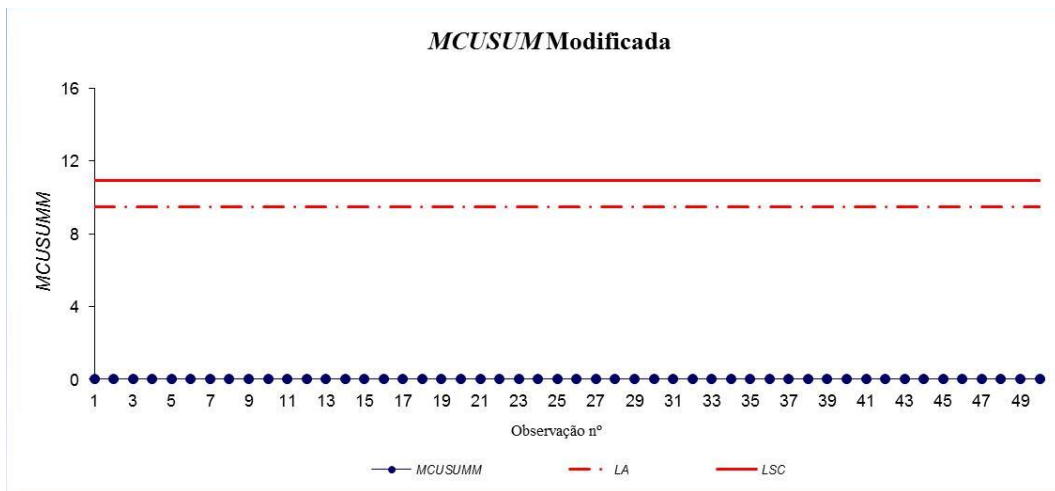


Figura V.41 Fase 2 - 0º agravamento da avaria - simulação

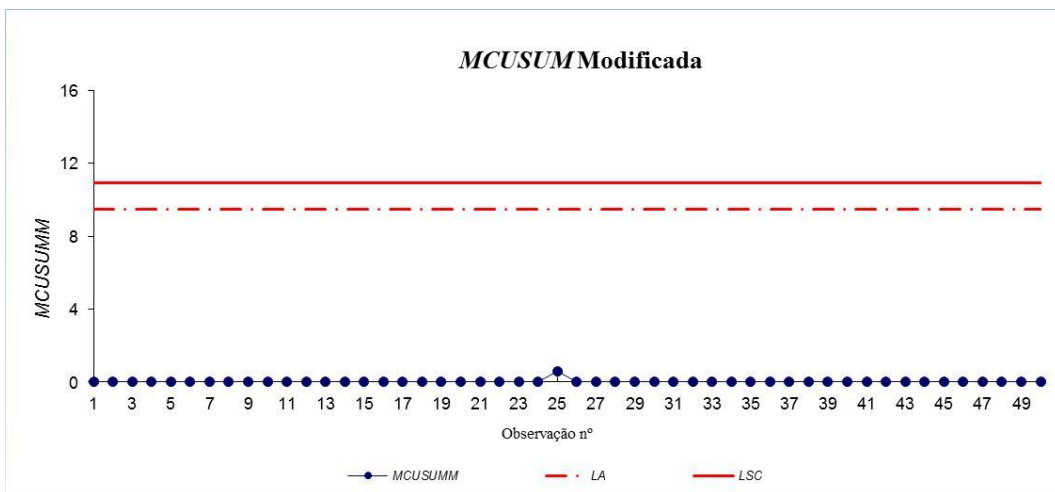


Figura V.42 Fase 2 - 1º agravamento da avaria- simulação

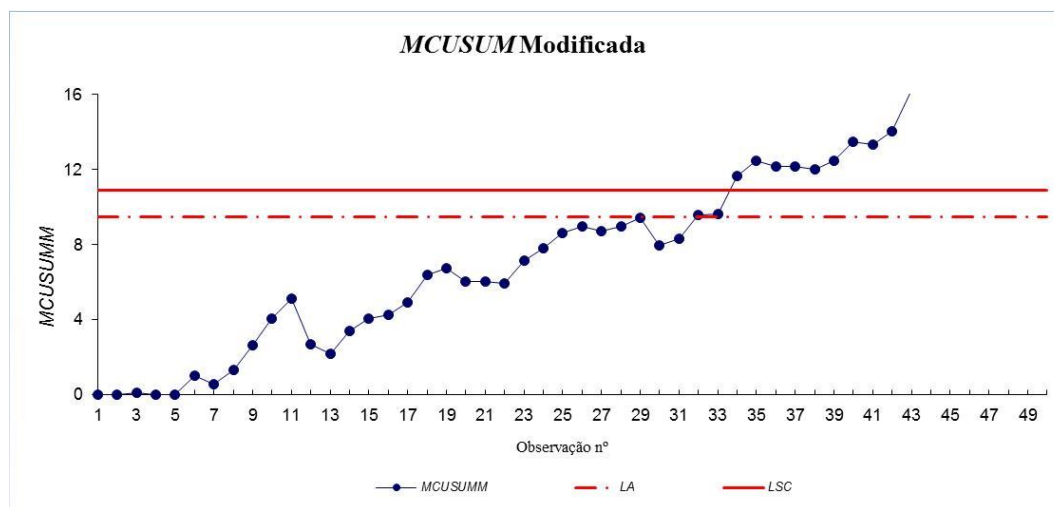


Figura V.43 Fase 2 - 2º agravamento da avaria - simulação

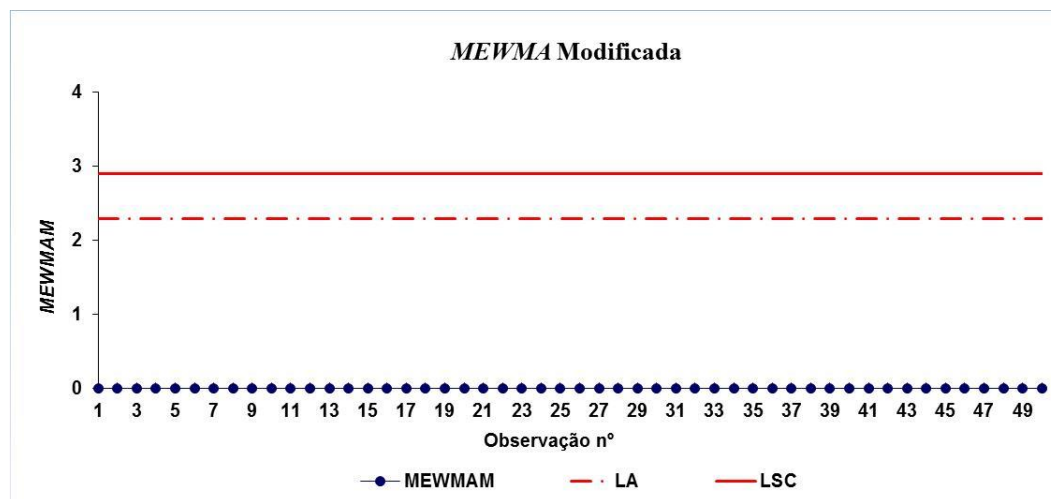
**MEWMAM**

Figura V.44 Fase 2 - 0 agravamento da avaria - simulação

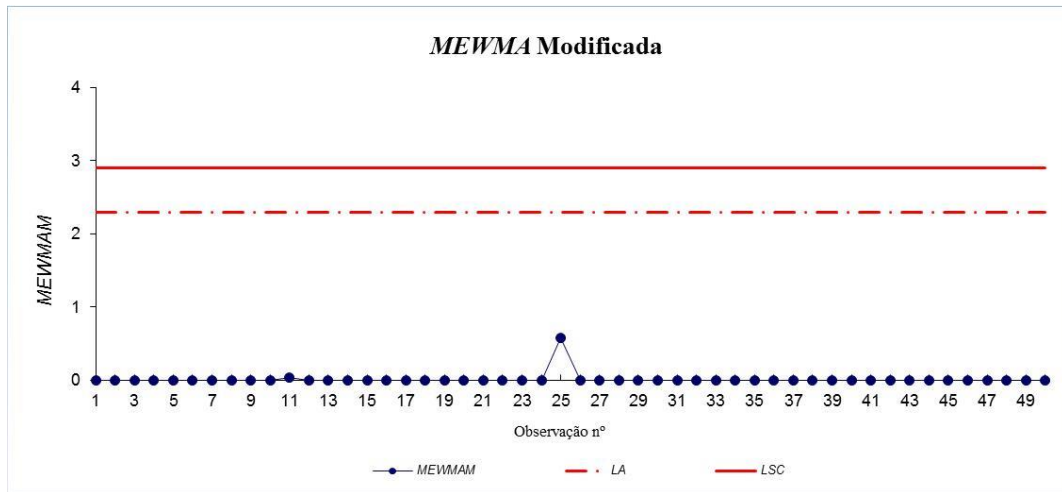


Figura V.45 Fase 2 - 1º agravamento da avaria - simulação

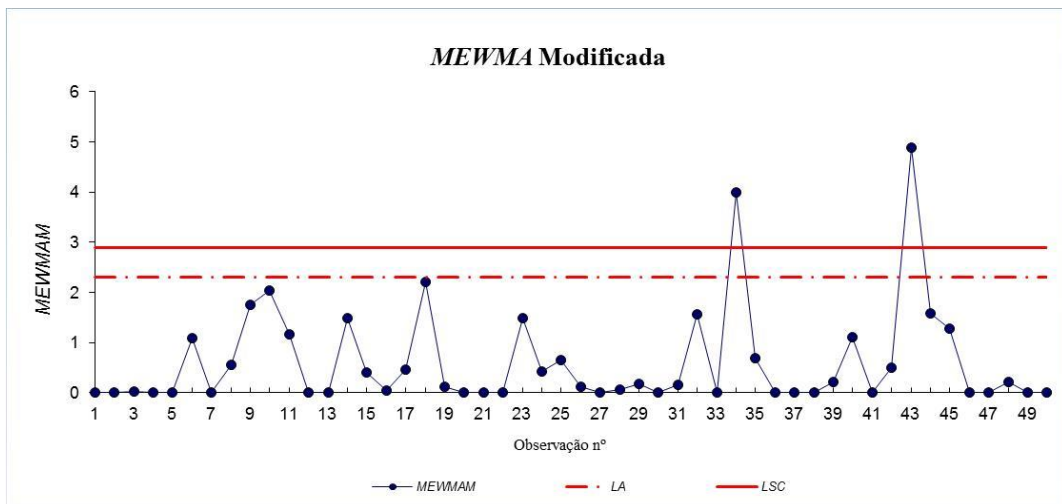


Figura V.46 Fase 2 - 2º agravamento da avaria - simulação



## **ANEXO VI**

### **ARTIGOS PUBLICADOS**



Vários artigos foram publicados durante o período de execução da dissertação. De seguida apresentam-se dois artigos publicados no ano de 2013. Os restantes artigos encontram-se em formato PDF em CD em anexo.

Artigo publicado na revista propulsor nº254 2013

## Monitorização da Condição de Turbinas a Gás com Cartas de Controlo Multivariadas $T^{21}$

S.S. Lampreia\* J.M. Dias\*\* J.G. Requeijo\*\* V. Vairinhos\*\*\*

\* *Escola Naval, CINAV - Departamento de Formação em Engenharia, Alfeite, 2810 Almada, Portugal*

\*\* *Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, 2829-516, Caparica, Portugal*

\*\*\* *CINAV – Alfeite, 2810 Almada, Portugal, CENTECH (IST), Avenida Rovisco Pais, 1 – 1049-001 Lisboa, Portugal*

[spgfs1@gmail.com](mailto:spgfs1@gmail.com)

[jfgr@fct.unl.pt](mailto:jfgr@fct.unl.pt)

[valter.vairinhos@sapo.pt](mailto:valter.vairinhos@sapo.pt)

*Abstract-* As turbinas a gás são equipamentos com elevada potência e robustez, mas como qualquer equipamento rotativo, estão sujeitas a vibrações mecânicas. Se se aplicar um sistema de acompanhamento da condição, este deve preferencialmente basear-se na coleta de dados Online. Visto as vibrações na sua generalidade representarem com elevada confiança o estado dos equipamentos, este vai ser o parâmetro controlado no equipamento. De forma a tratar os dados vai ser aplicado o controlo estatístico do processo, mas neste caso a equipamentos. Como uma carta multivariada congrega várias variáveis, o que permite aumentar a sensibilidade à deteção de eventuais valores anómalos, as cartas de controlo aplicadas são as tradicionais multivariadas. Como não é possível introduzir anomalias num equipamento real, foram estimados os seus parâmetros de funcionamento, média e variância, e efetuou-se uma variação progressiva dos seus valores para que com recurso ao MATLAB se gera-se os dados suficientes ao teste de sensibilidade das cartas de controlo. Com a aplicação desta metodologia pretende-se demonstrar a aplicação a equipamentos, de forma a proceder a uma manutenção com base na tendência dos resultados obtidos, para maximizar a confiança e disponibilidade dos equipamentos.

*Palavras Chave: Manutenção Condicionada, Cartas de Controlo Estatístico Multivariadas Tradicionais, Vibrações, Turbinas a Gás*

### 1. INTRODUÇÃO

A manutenção condicionada é hoje imperativa ao bom funcionamento dos equipamentos em ambiente industrial ou ambiente naval. De forma a ser possível este tipo de manutenção várias técnicas e metodologias estatísticas de predição de falhas podem ser aplicadas. [1] Antes de decidir que métodos aplicar, devemos considerar o tipo de equipamento a estudar, e quais as variáveis que melhor representam o seu estado. Neste sentido sendo as turbinas

---

<sup>1</sup> O artigo é reproduzido com autorização do editor e sujeito aos direitos de cópia impostos pelo mesmo.

da propulsão equipamentos vitais de um sistema de um navio, é imperativo o acompanhamento do seu estado. Foi decidido para o presente artigo monitorizar os dados de vibração da turbina e do compressor.

Assim, as cartas de controlo, do controlo estatístico do processo (SPC) podem assumir um papel vital, desde que adaptadas ao fato de se estarem a monitorizar não produtos industriais, mas equipamentos. No presente artigo as cartas eleitas para o estudo foram as cartas de controlo tradicionais multivariadas,  $T^2$ . [2] [3]

A modificação produzida nas cartas vai ser a nível da utilização dos limites ( $T_L$ ) definidos pelo fabricante, em vez da média. A aplicação desta metodologia, vai diminuir o tempo para a deteção, sendo esta possível mais cedo e de forma mais expedita, para que o operador consiga visualizar graficamente a evolução dos dados. [4]

## 2. CARTAS DE CONTROLO TRADICIONAIS $T^2$

O controlo do processo multivariado tradicional, tal como no controlo do processo univariado tem duas fases. Na fase 1 a estabilidade do processo é verificada e os parâmetros do processo são estimados com a aplicação da carta Hotelling  $T^2$  sem modificações. Na fase 2, os dados a recolher são monitorizados com a carta  $T^2$  mas agora com a modificação introduzida [3].

As cartas  $T^2$ , para ambas as fases utilizam observações individuais ( $n=1$ ) como dados a tratar.

Os dados que vão ser tratados, como se pode comprovar à frente, são todos independentes e possuem uma distribuição Normal, de acordo com dados gerados. Neste caso considerando  $p$  observações sob controlo e independentes temos,  $X_{ij} = \mu_j + \varepsilon_{ij}$  onde  $X_{ij}$  é a observação para a variável  $j$ , e  $\mu_j$  é a média do processo para a variável  $j$  e  $\varepsilon_{ij}$  são as variáveis aleatórias com média zero e um desvio padrão  $\sigma_\varepsilon$  (ruído branco).

### Fase 1

Na fase 1, deve ser considerada uma colheita de  $m$  observações individuais  $X_{jk}$  ( $j=1,2,\dots,p$  e  $k=1,2,\dots,m$ ), onde a média da amostra ( $\bar{X}_j$ ), a variância da amostra ( $S_{ij}$ ) e a covariância  $S_{jh}$  são calculadas. O vetor média ( $\bar{X}$ ), é dado pela equação (1) e a matriz covariância  $S$ , é dada pela equação (2). [5]

$$\bar{X} = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_p)^T \quad (1)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{1p} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{2p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ S_{p1} & S_{p2} & S_{p3} & \dots & S_{pp} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Tanto a fase 1 como a fase 2 utilizam as cartas de  $T^2$ , que, para cada valor de  $k$  se baseia na seguinte estatística:

$$(T^2)_k = (X_k - \bar{X})^T S^{-1} (X_k - \bar{X}) \quad (3)$$

O vetor  $\bar{X}$  e a matriz  $S$  são calculados utilizando os dados da fase 1. O limite superior de controlo (LSC) para ambas as fases encontra-se na tabela 1. [6] [7]

Nesta tabela,  $\beta_{\alpha;p/2;(m-p-1)/2}$  é o percentil à direita, para uma probabilidade  $\alpha$ , duma distribuição Beta com os parâmetros  $p/2$ ,  $(m-p-1)/2$  e  $F_{\alpha;p;m-p}$  é o percentil à direita para uma probabilidade de  $\alpha$ , da distribuição de Fisher com  $p$  e  $(m-p)$  graus de liberdade, respetivamente numerador e denominador.

Na fase 1 os parâmetros das características da qualidade são desconhecidos, então são calculados com base nos dados prévios. Para as cartas multivariadas existem regras para estabelecer o número mínimo de observações para estabelecer os parâmetros do processo. Em Pereira & Requeijo (2012), são propostas  $m$  observações individuais dadas por  $180p \leq m \leq 300p$ . [8]

Tabela 1 – Limites de Controlo para as Cartas  $T^2$

Carta	LC	LSC
Fase I	0	$\frac{(m-1)^2}{m} \beta_{\alpha;p/2;(m-p-1)/2}$
Fase II	0	$\frac{p(m+1)(m-1)}{m(m-p)} F_{\alpha;p;m-p}$

## Fase 2

Na fase 2, o objetivo é monitorizar o equipamento de forma a detetar em tempo útil eventuais anomalias, e intervir tecnicamente somente se for necessário. A intervenção será necessária quando o valor de vibração atingir um valor o qual afeta o estado dos equipamentos. Para isso a carta  $T^2$  deve ser modificada de modo a que considere os limites definidos pelo fabricante.

A modificação da estatística  $T^2$  será então baseada, para cada variável  $j$ , num nível de vibração aceitável  $T_L$ . Este valor é calculado em função do nível máximo de vibração aceitável fornecido em normativo ou pelos fabricantes dos equipamentos,  $(T_L)_{Standard}$ , pelo desvio padrão e pelo fator de segurança  $k$  (assumindo uma distribuição Normal, no presente caso sugere-se  $k = 3$ ), conforme se segue:

$$(T_L)_j = ((T_L)_{Standard} - k\sigma)_j \quad (4)$$

A estatística  $T^2$  é definida por

$$(T^2)_k = (X_k^* - T_L)^T S^{-1} (X_k^* - T_L) \quad (5)$$

onde

$$(X_k^* - T_L) = \max(0; X_k - T_L) \quad (6)$$

Nesta carta dois tipos de limite são definidos, o Limite de Alerta (LA) definido para  $\alpha_j = 1\%$  e o Limite Superior de Controlo (LSC) definido para  $\alpha_j = 0,2\%$ . Os valores destes limites são calculados aplicando a equação de LSC da fase 2, dado na tabela 1. [8]

### 3. AÇÕES A TOMAR - METODOLOGIA

Antes de iniciar a aplicação da metodologia propriamente dita, a fase 1 estuda a independência e normalidade dos dados.

Após isso a carta  $T^2$  chart deve ser construída de forma a calcular o vetor média e a matriz covariância. Se os dados forem dependentes o modelo ARIMA deve ser aplicado, mas como não é o caso dos presentes dados, esta matéria não será aqui abordada, para mais informação deverá ser consultado (Pereira e Requeijo, 2012).

Depois na fase 2 a carta  $T^2$  é utilizada para monitorizar o comportamento do equipamento. Esta fase inicia-se desde o primeiro registo de dados na fase 2. E as ações só são tomadas sob determinadas circunstâncias, baseadas em normativo ou dados do fabricante.

Neste artigo foi efetuada uma variação da média e do desvio padrão dos dados para testar para simular a eventual degradação do equipamento

A metodologia proposta para dados independentes é conforme se segue:

- Coletar dados de mais que uma variável distinta (dados de vibração) quando o equipamento está em boas condições de funcionamento.
- Testar se os dados são independentes, utilizando a FACE e a FACPE (para mais informação consultar [8]).
- Como os dados são independentes, constroi-se a carta  $T^2$  com base nos dados recolhidos. Verifica-se a estabilidade do processo, a normalidade dos dados e estima-se o vetor média e matriz covariância das vibrações.
- Para monitorizar o nível de vibração, controli-se a carta  $T^2$ , utilizando os dados recolhidos na fase 2, em que vários agravamentos da avaria introduzida foram efetuados.
  - Estima-se os dois limites de controlo para controlar o nível médio da vibração, o limite superior de controlo (LSC) e o Limite de Aviso (LA).
  - Baseado em dados do fabricante/instalador são definidos os níveis de vibração para os quais o sistema deve ser reparado.
  - Estabelecer as regras para intervir no sistema:
    - Efetuar uma intervenção para detetar alguma situação anómala quando existirem 8 pontos consecutivos acima do nível de alerta.
    - Proceder a uma intervenção de manutenção quando existirem 3 pontos consecutivos acima do LSC.

### 4. APLICAÇÃO PRÁTICA

Na aplicação prática, foram utilizados dados de vibração uma turbina a gás. Face à existência de poucos dados, gerou-se na primeira fase dados através do Bootstrap do Matlab, e na segunda fase após a definição dos parâmetros efetuou-se a variação do desvio padrão e media (Figura 1). Para cada ponto de medida corresponde a vibrações Self ou Induced, a vibração vem em mm, e são valores globais de medida. Os dados inicialmente recolhidos consideraram que a turbina estava em funcionamento há pelo menos 30min.

#### Equipamento sob estudo

A metodologia vai ser aplicada a dados de vibração de uma turbina a gás LM2500 que faz parte do sistema propulsor de um navio. As suas características gerais são as seguintes:

- Turbina aero-derivada-GE7LM2500-SA-MLG/G17;
- É do tipo “split-shaft”, com ligação termodinâmica
- Rendimento térmico: 37%
- Potência máxima: 19.575 Kw
- Velocidade de saída: 3600 rpm
- Temperatura de evacuação: 530°C
- Dimensões: 21345mm x 2134 mm x 6629mm

A TG LM2500, 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 (T.AP). [2]

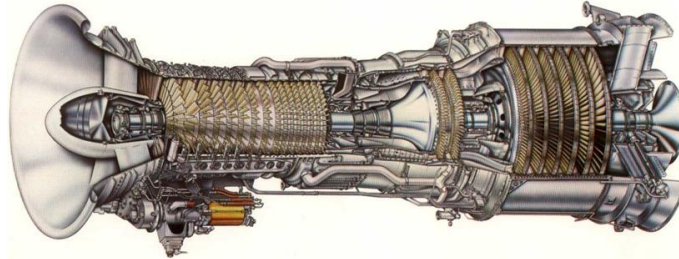


Figura 1 – Turbina LM2500

Vão ser considerados quatro sensores para recolha dos dados de vibração. Em que se considera as vibrações próprias da turbina (do Compressor e da Turbina de Potência) e as induzidas constituídas pela vibração que é induzida pela outra parte da turbina (do Compressor e da Turbina Potência).

Tabela 2 - Variáveis Monitorizadas

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)

A nível dos limites definidos pelo fabricante, para o gerador de gases, aos 4 mils é dado alarme e aos 7mils a turbina para de emergência. Para o caso da turbina de potência, aos 7 mils é dado o alarme e aos 10 mils a turbina para de emergência. De notar que outras variáveis da turbina podem ser testadas.

### Fase 1

Considerou-se que a turbina estava a funcionar sob boas condições antes da introdução da variação da média e do desvio padrão. E por isso é possível estimar os parâmetros que caracterizam o funcionamento da turbina, através de uma amostra de 250 observações individuais ( $n = 1$ ).

Assim após o gerar dos dados, para se poder dar início à fase 1, utilizou-se o programa *Statistica*, para verificar a sua independência através da comparação da *EACF* com *EPACF* conforme se demonstra para a variável SNV0374 na figura 2. Como era expectável, todas as variáveis deram independentes, pelo que foi possível aplicar aos dados as cartas de *Shewhart* diretamente.

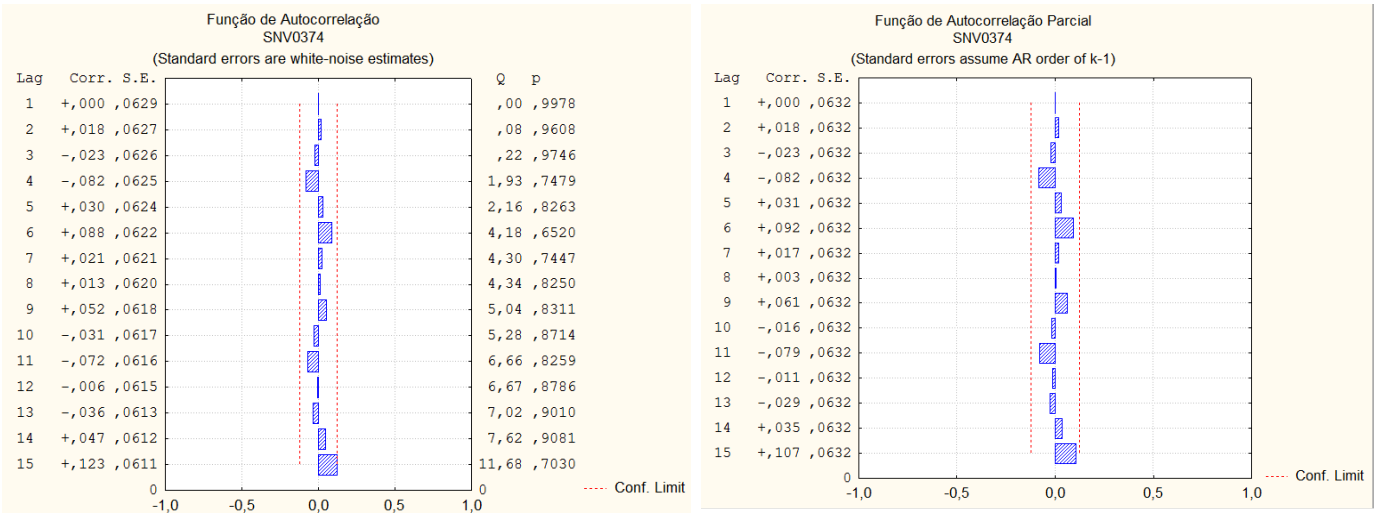


Figura 2 - FACE e FACPE para o Sensor SNV0374

Foi ainda analisada a distribuição dos dados através do teste de Kolmogorov-Smirnov, e porque se tem  $D_{Crítico} = \frac{0,886}{\sqrt{N}} = \frac{0,886}{\sqrt{250}} = 0,056$  para  $\alpha = 5\%$ , e com o teste para o sensor SNV0374:  $d=0,03294$ , Fig. 3, então  $d < D_{Crítico}$ , e a distribuição é considerada Normal.

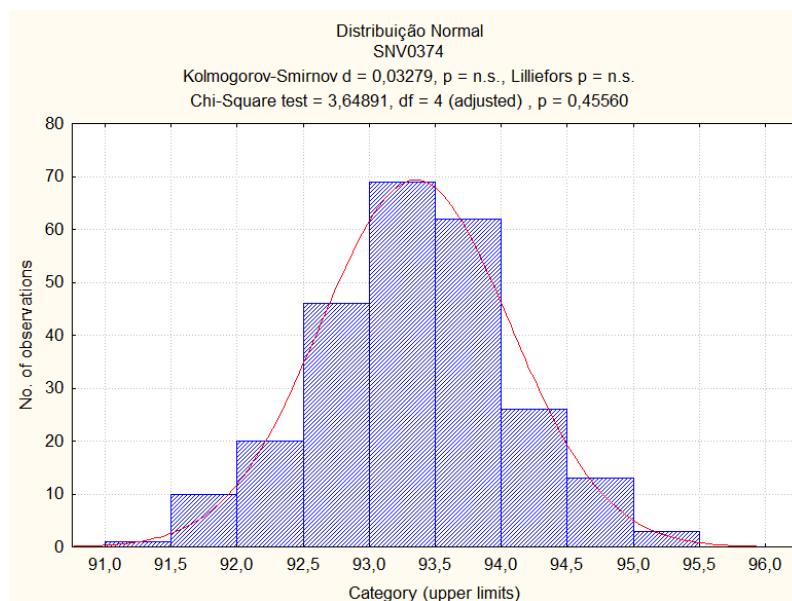
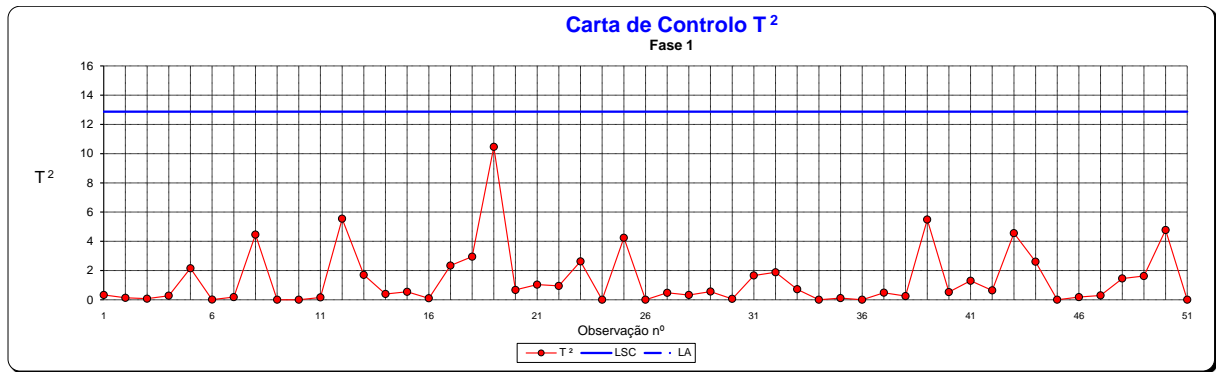


Figura 3 - Estudo da Distribuição para o Sensor SNV0374

Constrói-se então a carta  $T^2$  Chart utilizando os dados gerados, e como não existem causas especiais de variação vai-se calcular o vetor média e a matriz covariância.

Figura 4 - Fase I - Carta  $T^2$ 

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 93,111 \\ 93,336 \\ 90,632 \\ 73,888 \end{bmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0,272245 & 0,158276 & 0,082448 & 0,202970 \\ 0,158276 & 0,516541 & 0,072434 & 0,132664 \\ 0,082448 & 0,072434 & 0,253924 & 0,315069 \\ 0,202970 & 0,132664 & 0,315069 & 0,734575 \end{bmatrix}$$

**Fase 2**

Considerando os limites definidos pelo fabricante constantes na tabela 3, vai-se efetuar a definição de  $(T_L)$ .

Tabela 3- Limites do Fabricante

Nome Sensor	LA (mils)	LSC (mils)
SNV0374	4	7
SNV0375	4	7
SNV0376	7	10
SNV0377	7	10

Vamos trabalhar com os níveis de 4 e 7 mils que correspondem a um deslocamento de 101,6 e 177,8 mm respetivamente, e representam o  $(T_L)_N$  para a variável respetiva.

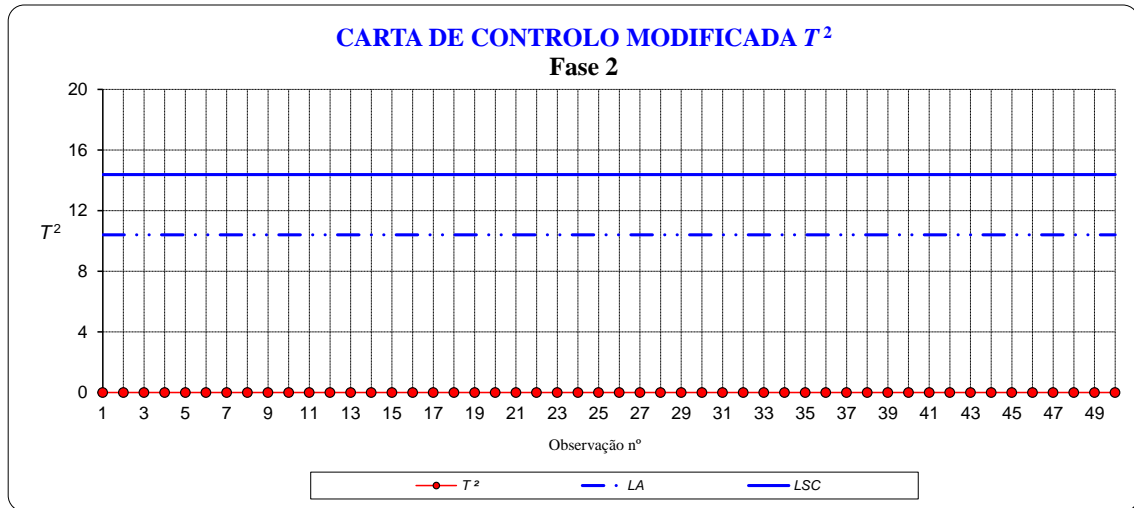
$$(T_L)_N = \begin{bmatrix} 101,6 \\ 177,8 \\ 101,6 \\ 177,8 \end{bmatrix} \quad (T_L)_j = ((T_L)_N - k\sigma)_j = \begin{bmatrix} 100,035 \\ 175,644 \\ 100,088 \\ 175,299 \end{bmatrix}$$

De forma a monitorizar a condição da turbina, foram desenvolvidas as cartas  $T^2$  Modificadas para utilizar dados de vibrações. Os limites de controlo da carta são os constantes na tabela 4.

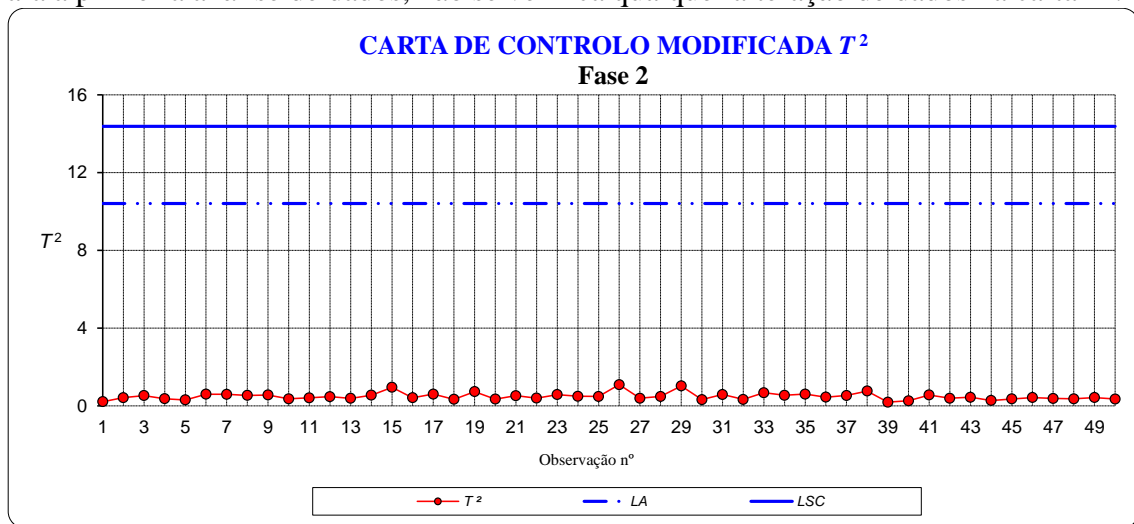
Na fase 2 utilizam-se os limites do fabricante utilizados na fase 1, por isso a monitorização é efetuada desde a primeira observação. Foram por isso gerados 50 valores (observações individuais) para cada uma das variações da média e do desvio padrão, num total de 5 grupos com diferentes agravamentos de vibração.

Tabela 4 – Limites de controlo da carta  $T^2$  Modificada

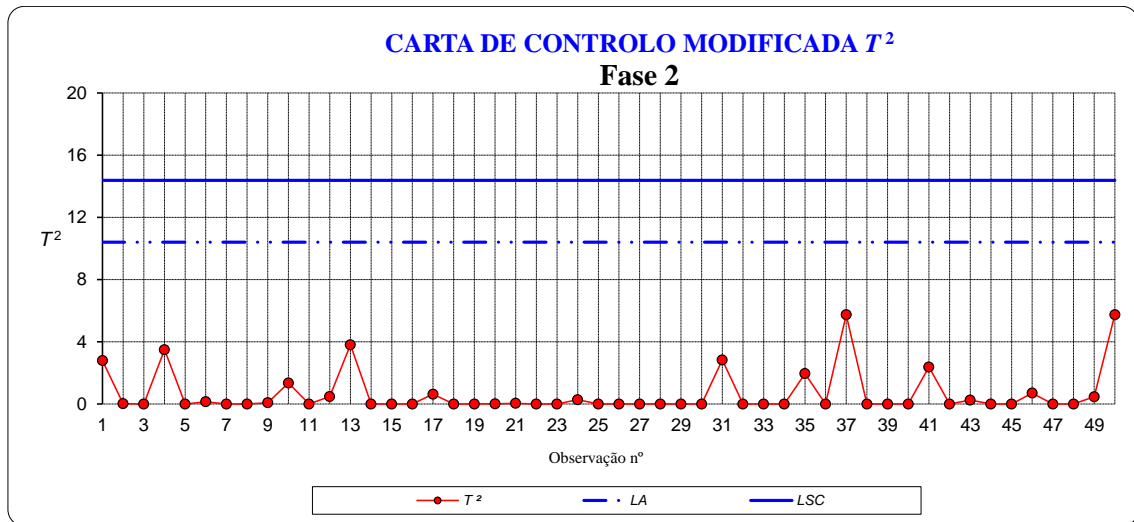
		AL		UCL	
$p$	$m$	$a_i$	$a$	$a_i$	$a$
4	250	1%	3,94%	0,20%	0,80%
Limits		14,38		10,41	

Figura 4 – Carta  $T^2$  Modificada sem alteração da média e desvio padrão

Para a primeira análise de dados, não se verifica qualquer alteração de dados na carta  $T^2$ .

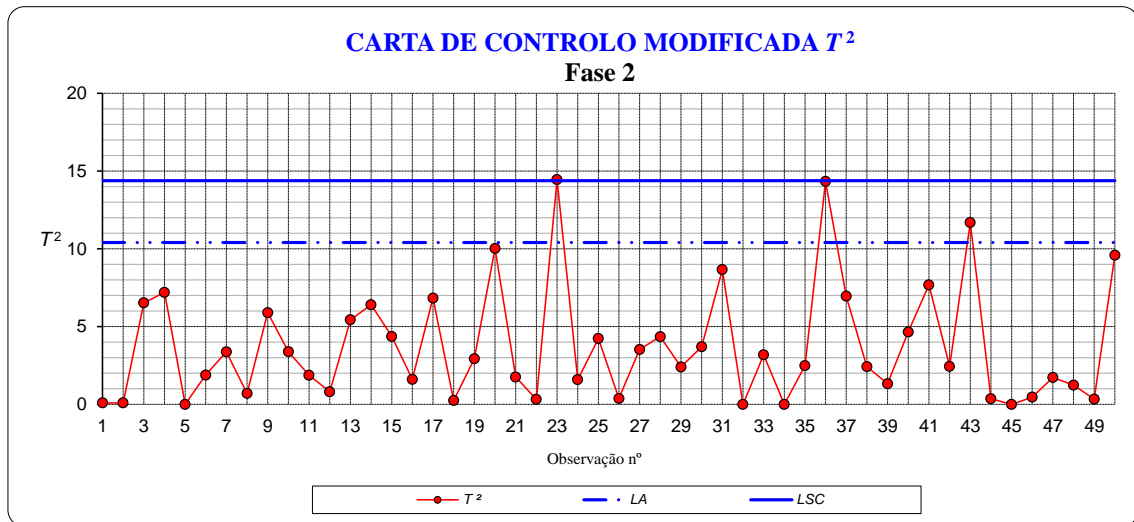
Figura 5 - Carta  $T^2$  Modificada com a primeira alteração da média e desvio padrão

Para a primeira alteração a carta começou a efetuar os primeiros registos, demonstrando a sua sensibilidade.



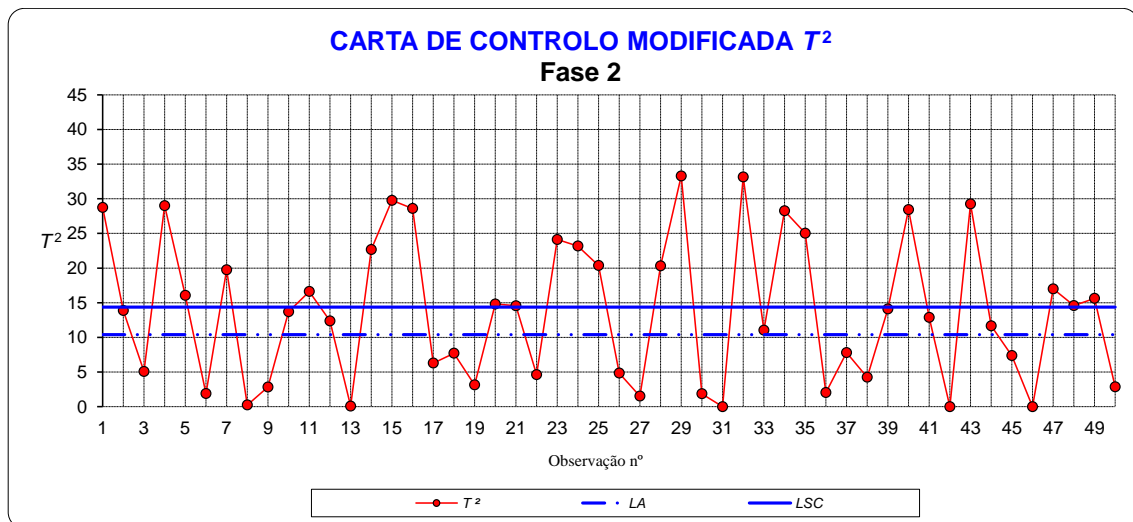
**Figura 6 - Carta  $T^2$  Modificada com a segunda alteração da média e desvio padrão**

Para a segunda alteração os registos de vibração aumentam o seu valor, mas não atingem o limite de aviso.



**Figura 7 - Carta  $T^2$  Modificada com a terceira alteração da média e desvio padrão**

Para a terceira alteração, com agravamento das vibrações verificam-se os primeiros pontos acima do limite de alerta (ponto nº43) e acima do limite superior de controlo (ponto nº 23 e 36).



**Figure 8 - Carta  $T^2$  Modificada com a quarta alteração da média e desvio padrão**

Para o quarto agravamento dos dados, em que a média já teve um aumento significativo, surgem vários pontos acima do LA e LSC, sendo que na observação nº16 é necessário proceder a uma intervenção de manutenção, na 25 e também na 49. Se o sistema sofrer uma intervenção logo na 16, os resultados seguintes seriam influenciados.

## 5. CONCLUSÃO

Considera-se que a possibilidade das cartas  $T^2$  Modificadas serem aplicadas a dados de vibrações foi demonstrada. Todos os dados gerados em programa foram independentes e têm uma distribuição Normal. A aplicação destas cartas permitiu ver a evolução e a tendência dos dados ao longo do seu período de funcionamento.

Quando as cartas  $T^2$  Modificadas são aplicadas, o nível de vibração máximo definido pelo fabricante deve ser tido em consideração, sendo aplicado nos cálculos.

A aplicação de uma carta multivariada permite a deteção de tendência mais celere, em que a conjugação de várias variáveis demonstram o verdadeiro estado do equipamento.

A metodologia sugerida vai evitar paragens não planeadas nos equipamentos aumentando a disponibilidade e o grau de confiança na instalação.

## REFERENCES

- [1] Dias, J. M., Requeijo, J. R. e Pereira, Z. L. (2009). “Monitorização do estado de condição dos sistemas reparáveis” in: *Riscos Industriais e Emergentes*; C. Guedes Soares, C. Jacinto, A. P. Teixeira, P. Antão (Eds), Edições Salamandra, Lisboa, Vol.1, pp. 501-512.
- [2] Lampreia, Suzana, Parreira, Rui (2011). “Análise de Condição em Turbinas a Gás Marítimas – Aplicação Cartas Controlo”. ENEGI2011. Escola de Engenharia - Universidade do Minho, 27-28maio2011.
- [3] Lampreia, Suzana, Requeijo, José, Dias, José, Vairinhos, Valter (2012).  $T^2$  Charts Applied to Mechanical Equipment Condition Control, International Conference on Intelligent Engineering Systems 2012-INES2012. Caparica.

- [4] Lampreia, S. and R. Parreira (2011). “Manutenção Lean com Aplicação Técnicas Qualidade na Análise Preditiva de Fiabilidade”, *Manutenção*, 3º e 4º Trimestre 2011.
- [5] J. E. Jackson (1985). "Multivariate Quality Control", *Communications in Statistics – Theory and Methods*, Vol. 14, pp. 2657-2688.
- [6] C. A. Lowry and D. C. Montgomery (1995), "A Review of Multivariate Control Charts", *IIE Transactions*, Vol. 27, pp. 800-810.
- [7] R. L. Mason, N. D. Tracy and J. C. Young (1997). "A Practical Approach for Interpreting Multivariate  $T^2$  Control Chart Signals", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, pp. 396-406.
- [8] Z. L. Pereira and J. G. Requeijo (2012). *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos (Quality: Statistical Process Control and Planning)*, FCT/UNL Foundation Editor, Lisboa.

Artigo apresentado no ICOVP2013  
11<sup>th</sup> International Conference on Vibration Problems  
Z. Dimitrovová et al. (eds.)  
Lisbon, Portugal, 9-12 September 2013

## EQUIPMENT CONDITION MONITORING WITH AN APPLICATION OF MEWMA CONTROL CHARTS AND OTHERS CHARTS<sup>2</sup>

S.S. Lampreia\*<sup>1</sup> J.G. Requeijo<sup>2</sup>, J.M. Dias<sup>2</sup>, V. Vairinhos<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Naval Academy, CINAV – Mechanical Engineer Department  
[spgfsl@gmail.com](mailto:spgfsl@gmail.com)

<sup>2</sup> Faculty of Science and Technology of the Universidade Nova of Lisbon, Mechanical and  
Industrial Engineer Department  
[jfgr@fct.unl.pt](mailto:jfgr@fct.unl.pt)  
[jad@fct.unl.pt](mailto:jad@fct.unl.pt)

<sup>3</sup> CINAV, CENTECH (IST)  
[valter.vairinhos@sapo.pt](mailto:valter.vairinhos@sapo.pt)

**Keywords:** Condition Monitoring, Vibration Detection and Analysis, Statistical Process Control, Multivariate Control Charts MEWMA

**Abstract.** *Considering the operation of electromechanical systems, we know that in the future, probably it state will be degraded. In order to minimize losses and the increase of maintenance costs, conditioning monitoring should be applied to critical equipment (Condition Based Maintenance - CBM) [1]. Conditioning monitoring can use statistical methods to treat the collected data, so the state of the equipment can be known in the present moment. The Accelerated Failure-Time Models can be an important method for prediction system failures. In this paper the data collected are vibration values, obtained with overall vibration values (RMS) from four variables and in a second phase, failure will be induced to degrade the equipment state. If data isn't independent, it is suggested modeling data with ARIMA (p, d, q) models [2], and use the residues for the first Phase. In the Phase I, the estimation of parameters is achieved using the traditional Shewhart charts,  $T^2$ , and only after applying the define ARIMA model, the four variables are conjugated. The special multivariate control charts will be applied for the data statistical treatment, in order to predict failures. Considering the data independence and with a Normal Distribution, MEWMA Modified Control Charts [3] will be applied in the Phase II to data collected from an electric pump, by this procedure, behavior of data will be controlled. In phase II, if the data isn't independent, the prevision errors are used. The previous methodology is only for faults detection, but with graphical representation of the vibration frequencies in order to velocity (m/s) will be probably possible to make the*

---

<sup>2</sup> O Abstract do artigo é reproduzido com autorização do editor e sujeito aos direitos de cópia impostos pelo mesmo.

diagnosis, and determine which component is causing the vibration in the electropump. When we make the application of these methodologies it will be possible to run the online condition monitoring, and act in time, to minimizing maintenance costs and unannounced stops.

## 1 INTRODUCTION

When there is a project to implement a condition based maintenance system, the type and equipment performance must be considered. The main target is to reduce maintenance costs and optimize operation.

To have a highest level of the equipment state, statistical methods are applied. The objective is to categorize anomalies, identify components involved, estimate possible tendencies and predict the time to failure. [1]

To test systems reliability Weibull model and Laplace test is used. [4]. By these methods we can study the system failure tendency.

Considering repairable systems the data collected and processed by statistical methods can be collected by sensor installed in key points, and it can be a fixed one, or portable.

When we decide the parameters to measure in equipment, we believe that that are the ones that best represent the equipment behavior. In this subject, also many can be chosen, in spite of temperature and pressures in sensors/manometers, in rotating equipment's vibrations, oil analysis, thermography can be the most representative of its states [5], both are suggested because it doesn't needed any intervention during the collet action. In the present study, the vibration was the elected.

In this work a portable vibration collector was used, the uploading of data being controlled using the equipment software. To define the vibration parameters and monitoring the Statistical Process Control (SPC) with some modifications was applied. To diagnosis the detected anomaly graphical representations were built represented frequency vs speed.

## 2 CONTROL CHARTS

Given the right conditions, multivariate control charts can be applied for process control. In this work, Hotelling Chart,  $T^2$ , was used to equipment monitoring in first phase, to check the equipment stability and define it's parameters, and in the second phase the MEWMAM control chart will do the monitoring.

### 2.1 Phase I - $T^2$ Traditional Control Charts

The design of the  $T^2$  charts obey to some rules, at first, more than one variable should exist, and then enough data should be collected to estimate the process parameters. Because of the data specifications, individual observations ( $n=1$ ) charts will be used. [6]

#### Independent Data

If the observations of  $p$  variables in control are independent, we have,  $X_{ij} = \mu_j + \varepsilon_{ij}$ , where  $X_{ij}$  is the observation  $i$  for variable  $j$ ,  $\mu_j$  is the process mean for the variable  $j$ ,  $\varepsilon_{ij}$  are iid normal random variables with mean zero and standard deviation  $\sigma_\varepsilon$  (white noise).

In phase 1 with  $m$  individual observations collected,  $X_{jk}$  ( $j = 1, 2, \dots, p$  and  $k = 1, 2, \dots, m$ ), the mean,  $(\bar{X}_j)$ , the variance ( $S_{ij}$ ), and the covariance  $S_{jh}$  are calculated. Based on this

statistics, the vector mean ( $\bar{X}$ ) and the covariance matrix ( $S$ ) are given by the next expressions:

$$\bar{X} = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_p)^T \quad S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{1p} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{2p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ S_{p1} & S_{p2} & S_{p3} & \dots & S_{pp} \end{bmatrix}$$

(1)

For each  $k$  the  $T^2$  control charts are based on the statistic in the expression 2, as follows:

$$(T^2)_k = (X_k - \bar{X})^T S^{-1} (X_k - \bar{X})$$

(2)

The *Center Line (CL)* and the *UCL* for the phase I are defined in Table 1. The expression  $\beta_{\alpha; p/2; (m-p-1)/2}$  is the right percentile, for a probability  $\alpha$ , from the beta distribution with the parameters  $p/2$ ,  $(m-p-1)/2$ . The rule applied to estimate the parameters for  $T^2$  Control Charts in phase I, is to have the sample size  $m$  ( $180p \leq m \leq 300p$ ). [3]

Chart	CL	UCL
Phase I	0	$\frac{(m-1)^2}{m} \beta_{\alpha; p/2; (m-p-1)/2}$

Table 1:  $T^2$  Control Chart Limits.

### Autocorrelated Data

If a variable has a significant autocorrelation, the  $T^2$  statistic is estimated using the residues to every observation. The parameters  $X_k$ ,  $\bar{X}$  and  $S$  are replaced with the corresponding residues and the mean vector and covariance residues matrix are built. To calculate the residues is built a model with correlated variables, so the *ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)* ( $p, d, q$ ) model is applied. [6]

The process autocorrelation is analyzed studying the Autocorrelation Function (*ACF*) and Partial Auto-Correlation Function (*PACF*). To decide which model we have, the estimated autocorrelation function (*EACF*) is compared to the autocorrelation function (*ACF*) and the estimated partial autocorrelation function (*EPACF*) with the partial autocorrelation function (*PACF*). [3] [7]

A process follows a *ARIMA* ( $p, d, q$ ) model if  $\nabla^d X_t$  follows *ARMA*( $p, q$ ) model. The model defined by *ARIMA*( $p, d, q$ ):

$$\Phi_p(B) \nabla^d X_t = \Theta_q(B) \varepsilon_t \quad (3)$$

$$\Phi_p(B) = (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) \quad (4)$$

$$\Theta_q(B) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) \quad (5)$$

$$B = \frac{X_{t-1}}{X_t} \quad (6)$$

$$\nabla = \frac{X_t - X_{t-1}}{X_t}$$

(7)

See [3] for details.

The residues for the specified model are estimated by  $e_t = X_t - \hat{X}_t$ , where  $\hat{X}_t$  is an estimation of the process expected value for the period  $t$ . The  $T^2$  control chart is built using the residues. The process mean is estimated by equations 7 and 8 when the process is modeled by an  $AR(p)$  or by a  $MA(p)$ .

$$E(X) = \mu = \frac{\xi}{1 - \sum_{j=1}^p \phi_j} \quad (7) \quad E(X) = \mu \quad (8)$$

## 2.2 Phase II - Special Control Charts – Modified MEWMA

The use of cumulative charts is chosen instead of traditional control charts, given its sensibility to small changes.

The EWMA multivariate control chart, MEWMA, to control the mean is based on the  $T^2$  statistics, defined, for the  $i$  instant by:

$$T_i^2 = Z_i' \sum_Z^{-1} Z_i \quad (9)$$

where

$$Z_i = R X_i + (I - R) Z_{i-1}, \quad Z_0 = 0, \quad \sum_Z = \frac{\lambda}{2 - \lambda} \left( 1 - (1 - \lambda)^{2i} \right) \Sigma \quad (10)$$

In this equation,  $I$  is the identity matrix and  $R = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p)$ , where  $\lambda_j$  ( $j = 1, 2, \dots, p$ ) is a weighted constant from the  $j$  variable. Usually  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_p = \lambda$ , when this happen,  $Z_i$  is defined by:

$$Z_i = \lambda X_i + (1 - \lambda) Z_{i-1} \quad (11)$$

Since data is autocorrelated and we are applying the MEWMA, the next expressions will be used:

$$Z_i = \lambda(e_i - T_L) + (1 - \lambda) Z_{i-1} \quad \Sigma^{-1} (\lambda(e_i - T_L) + (1 - \lambda) Z_{i-1}) \quad (12)$$

An out of control situation is detected when  $T_i^2 > H$ , where  $H$  is the control limit.

In [8] the values of  $H$  for  $ARL_{In Control} = 200$  and for  $\delta(\mu)$  are suggested when:

$$p = 2, 4, 6, 10, 15 (0, 5; 1, 0; 1, 5; 2, 0; 3, 0) \text{ and } \lambda (0, 05; 0, 10; 0, 20; 0, 30; 0, 40; 0, 50; 0, 60; 0, 80).$$

From the same reference optimal values for MEWMA chart can be obtained, the best values  $\lambda$  and  $H$  for  $p = 4, 10, 20$  are for  $ARL_{In Control} = 500$ ,  $ARL_{In Control} = 1000$ , for different values of  $\delta(\mu) (0, 5; 1, 0; 2, 0; 3, 0)$ .

MEWMA chart, like univariate EWMA chart, shows a high sensitivity compared with  $T^2$  and  $\chi^2$ , and considering small and moderate shifts. [9]

### 3 ANOMALIES DIAGNOSIS

Vibrations are caused by periodical events-namely, anomalous events in the machines; its frequency can allow the anomaly diagnosis. [9] Vibration measure and analysis can allow the detection of most faults and an early stage, detecting faults without systems stop, and diagnose the cause of malfunction [10]. Although, vibrations can be characterized by: displacement, velocity e acceleration, in this work we will use the velocity (mm/s) measure.

The cause of vibration can eventually be found, inspecting the frequency spectrum where frequency is expressed by orders. For example: if we had a misalignment, we can find peaks at 1x, 2x and sometimes at 3x.

In this work abnormal frequencies will be analyzed; given the , extension of the field, only a partial vision will be presented. For more information Institute (2005) and Eshleman (1999) should be consulted.

### 4 METHODOLOGY

1. To define the methodology for monitoring data, sample size (m) is a fundamental input for specified statistical procedures.
2. In phase 1 study the data independence, comparing *EACF* and the *EPACF*. If data is autocorrelated, the *ARIMA* model should be applied, and the  $T^2$  chart is executed for the residues; if not the original data are used. When distribution is Normal and stable the mean vector and the covariance matrix are calculated. For this phase at least 200 samples of individual observations must be taken.
3. In the Phase 2 the *MEWMAM* chart is used to monitor the equipment. In this phase the equipment's are monitored since the first observation, and only under defined rules actions are taken. To define the rules, the  $T_{LStandard}$  described above should be evaluated according international standards or manufacture's rules. [7] To define the chart limits:
  - Estimate the two limits to control the mean level of vibration, specifically, the Upper Control Limit (*UCL*) and the Alert Value (*AL*).
  - Based on ISO 2372:2003 Standard, establish the vibration level which the system must have an intervention.
  - Rules to act on the system:
    - ♦ Execute an intervention to detect any anomalous situation when 8 consecutive points are above the *AL*.
    - ♦ Proceed to a maintenance intervention when 5 consecutive points above *UCL* are observed.
4. To proceed with the intervention act, we should know which the anomaly is, so the frequencies spectrum in order to velocity (mm/s) chart must be observed.

### 5 CASE STUDY

For the case study, vibration data from an electro pump was used. Four points were defined for data collection to represent the machine state.

To test the *MEWMA* sensitivity an anomaly with four state aggravations was forced. The vibration values are expressed in units of velocity (mm/s) for vibration global values (RMS).

For Phase 1, considering the electropump working properly, in Phase 1 the equipment parameters are estimated based on 241 individual observations. The first step is testing the data independence, comparing the *EACF* and *EPACF* with the *ACF* and *PACF*, for four variables, the result being a model that best fits the data. The result is that we have autocorrelated data, so we use the residues in the *Shewhart* control charts. The residues are estimated using the *Statistica* software. Treating the data independently for the Var2, was detected a point above the *UCL*, so it was substituted using the defined model. Figure 1 shows the *EACF* and *EPACF* for the variable 2, where autocorrelation is significant and we can see the *AR2* *ARIMA* model, where for *ACF* we have an exponential decrease after a certain lag order, and *PACF* for significant peaks through lags log (p).

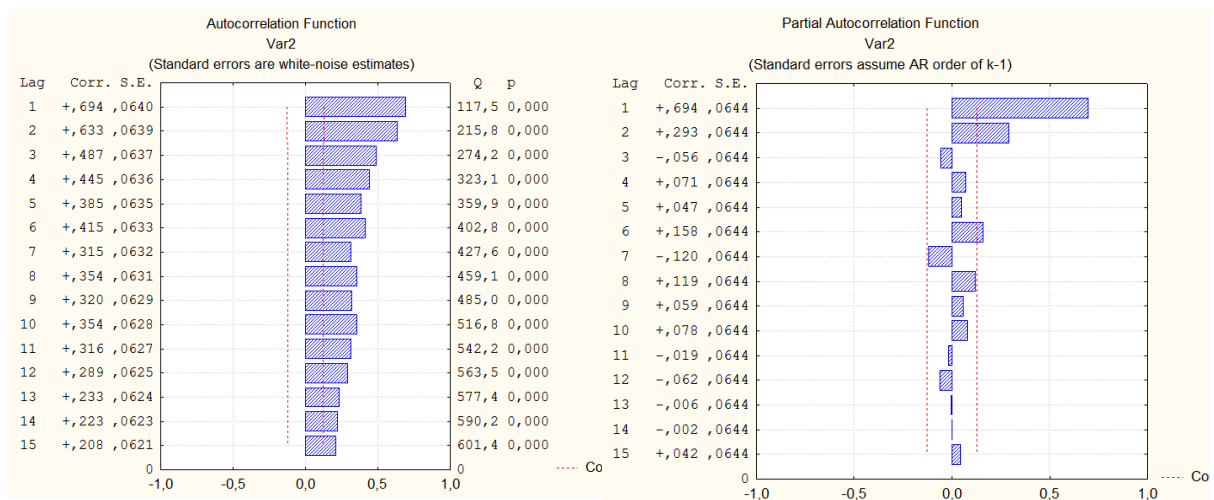


Figure 1: *EACF* and *EPACF* for Var2.

All the four variables are well fitted *AR(2)* *ARIMA* model, given space limitations we show values corresponding only to Var2:  $\xi=0,1025$ ,  $\varphi_1=0.4945$  and  $\varphi_2=0.2919$ .

Although, not presented in hear, all variables has been studied and have a Normal Distribution. When we analyze the  $T^2$  Chart, no special causes of variation are detected, so the mean vector (residues and variables) and covariance matrix are estimated. [3] For of graphic quality reasons, in figure 2, only 100 of the 241 samples are present.

$$\bar{e} = \begin{bmatrix} 0,00033 \\ 0,00021 \\ 0,00034 \\ 0,00041 \end{bmatrix} \quad \bar{X} = \begin{bmatrix} 0,406 \\ 0,4810 \\ 0,7400 \\ 0,5220 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 0,000726 & -0,000057 & 0,000137 & 0,000035 \\ -0,000057 & 0,000686 & -0,000123 & -0,000007 \\ 0,000137 & -0,000123 & 0,007102 & 0,000298 \\ 0,000035 & -0,000007 & 0,000298 & 0,001627 \end{bmatrix}$$

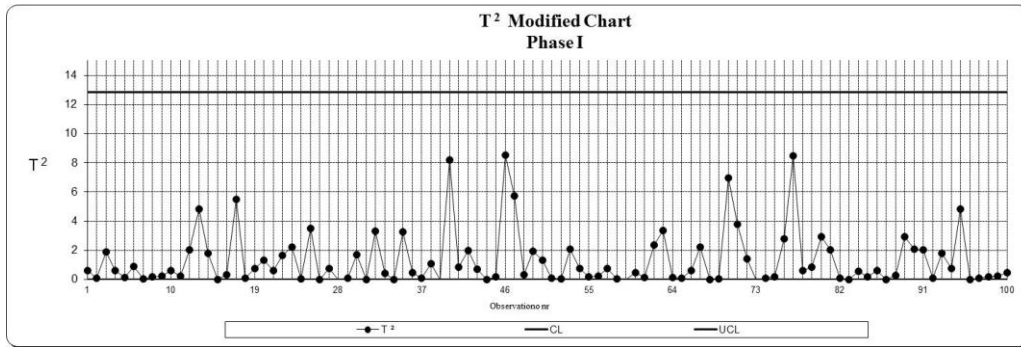


Figure 2: Phase 1 - Modified  $T^2$ .

For phase 2 the limit vibration was extracted from the ISO 2372:2003, and for an electrical engine with 1,5KW, 1.12 mm/s (RMS) is the allowable limit of an equipment of class I. It will be named as  $(T_L)_N = 1,12$ .

Having  $p=4$ , according Crowder (1989) abacus, the limits for MEWMAM charts are presented in table 4, so the  $K1$  is the Alert Level (2,1) and  $K$  (2,7) the Upper Control Limit, table 3.

The vibrations are monitored since the first data value. To test the chart sensitivity, 50 individual observations were read with the electric pump in normal operation; then, to accelerate the degradation, an anomaly and its aggravation through 4 stages was introduced.

Building the MEWMAM chart to monitoring the equipment, till the second aggravation no point is registered in the charts.

For the third aggravation was registered 3 points, but all of them are under control the UCL, Figure 3.

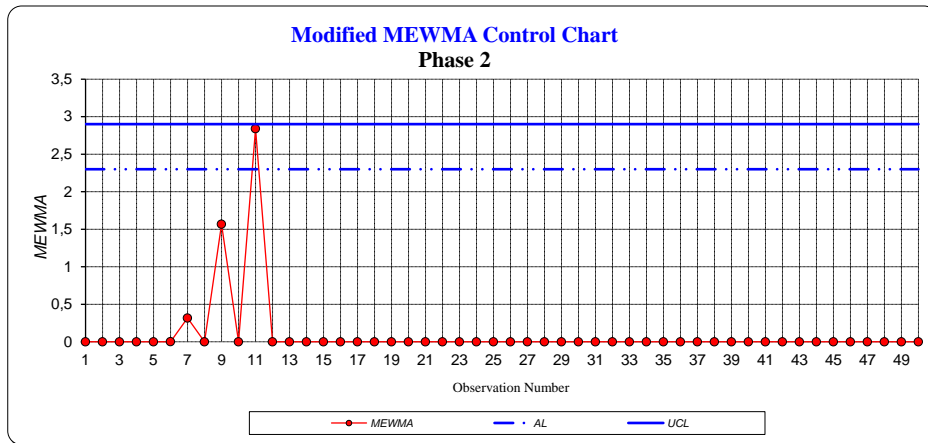
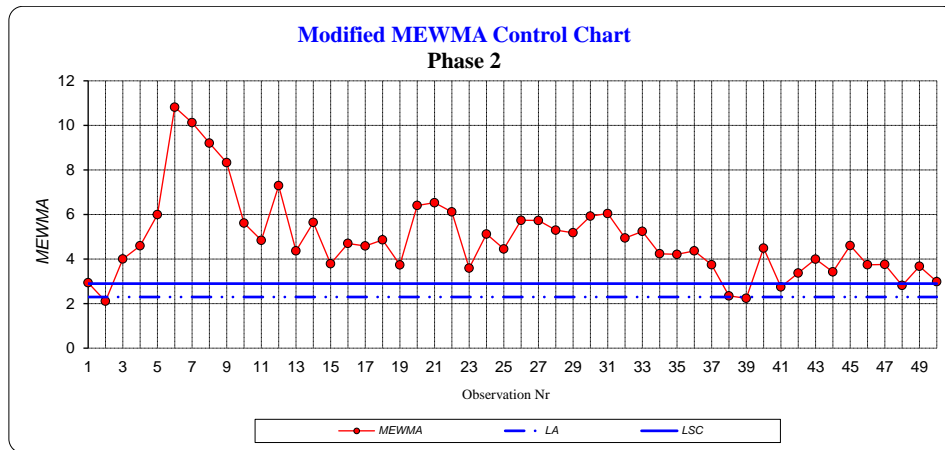


Figure 3: 3<sup>a</sup> Aggravation MEWMAM Control Chart.

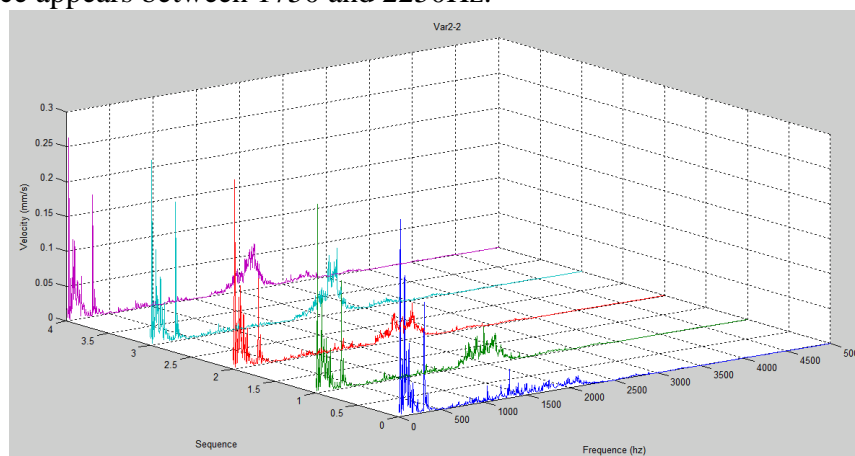


**Figure 4: 4<sup>a</sup> Aggravation MEWMA Control Chart.**

The use of *MEWMA* control charts shows a high level of sensitivity since the third observation, almost all of the data are above the upper control limit, figure 4.

For frequency spectrum analysis we must know the electro pump characteristics, as we saw, power is 1,5 KW, the velocity is 1500rpm, and the natural frequency is 25Hz. The results from the analysis are shown only for Var2. With no anomalies, only appeared the natural frequency at 25Hz. We have also signs of resonance between the 1750Hz and 2250Hz and between 2250Hz and 2750Hz.

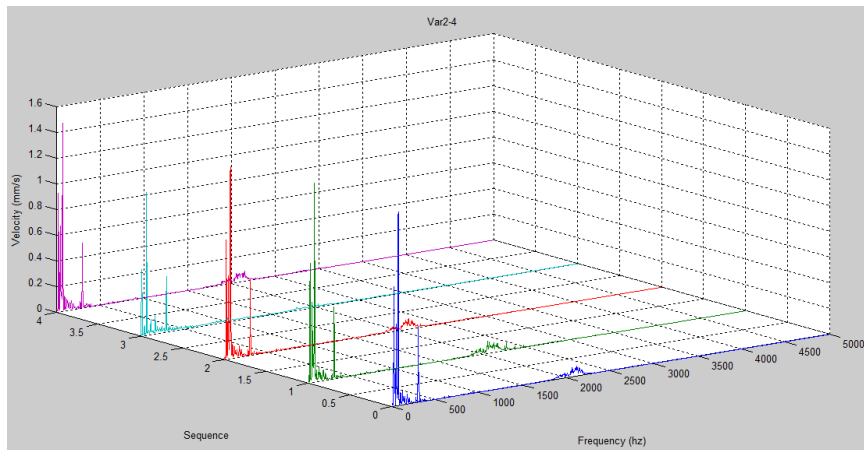
For the first state aggravation no big changes detected. In the second aggravation the values of vibrations became higher and a peak can be seen at 300Hz (12x), figure 5. Now the resonance appears between 1750 and 2250Hz.



**Figure 5: Var2 Data Analysis – 2<sup>th</sup> Aggravation.**

Given the detected peaks, we may probably be having problems, for example: a clearance bearing problem, a shaft eccentricity or blades anomaly.

By the 3<sup>rd</sup> aggravation the values take significantly higher values. The 4<sup>th</sup> aggravation is just a development of the 3<sup>rd</sup> aggravation, where the peak at 300hz has a 0,13mm/s increase (12x), figure 6. The peaks with 25hz and 75hz had get higher too, that represent the 1x and 3x orders.



**Figure 6: Var2 Data Analysis – 4<sup>th</sup> Aggravation.**

The natural frequency is 25hz, so we believe the peaks around this frequency are a consequence of the unscrewing. The causes are not explained by just one anomaly but to the whole set of misalignment but from various, misalignment between the pump and the electrical engine, imbalance in rotors, etc. If this was a real equipment which was being monitored, the situation should be monitored to detect a tendency. In case of a continuous aggravation it is recommend to see the tendency, if the aggravation continuous it is recommend to disassemble the electropump, do the dimensional control of the spare parts and repair or replace the damaged ones.

## 6 CONCLUSIONS

In equipment monitoring many mechanical and thermodynamics methods can be used to get data. In this article we explore the Statistical Process Control in equipment's monitoring.

To Phase 1, autocorrelated data was collected. So the  $T^2$  charts were applied using the residues from a fitted *ARIMA* model..

In Phase 2, the *MEWMA* were applied to the expected values, high sensitivity since the 3<sup>rd</sup> aggravation was shown.

Although the results, more tests, and maybe application to others equipment's, should be carry out.

Applying the control charts, we knew the equipment had an anomaly, but didn't know which one. To diagnosis the anomaly, a cascade graph using the frequencies and velocity registered, has shown a possible cause for the high observed vibration values.

We believe that the control charts application and the spectrum analysis is an effective monitoring method, knowing its real state and its tendency. This will enhance the performance of the maintenance, reducing the costs and raising the availability.

## REFERENCES

- [1] J. M. Dias, J. G. Requeijo, Puga Leal, R. and Pereira, Z. L., *Optimização do Período de Substituição Preventiva de Componentes em Função dos Custos (Optimization Period Component Preventive Replacement as a Costs Function)*, *Manutenção*, N°. 94/95, 3/4° Trimester de 2007, APMI, 2007.
- [2] J. Requeijo, S. Lampreia, P. Barbosa, J. Dias, V. Vairinhos (2012). *Controlo de condição de equipamentos mecânicos por análise de vibrações com dados autocorrelacionados (Control provided by mechanical vibration analysis with autocorrelated data)*. Encontro Nacional de Riscos Segurança e Fiabilidade 2012-

- ENRSF2012 (National Meeting of Security Risk and Reliability 2012 - ENRSF2012), Lisboa, Salamandra. Maio 2012.
- [3] Z. L. Pereira and J. Requeijo. *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos* (Quality: Planning and Statistical Process Control), FCT/UNL, Prefácio, Lisboa, 2012.
- [4] J. Dias. *Fiabilidade em Redes de Distribuição de Energia Eléctrica* (Reliability in Power Distribution Networks). FCT-UNL, Lisboa, 2002.
- [5] R. B. Randall. *Vibration-Based Condition Monitoring - Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. United Kingdom: John Wiley and Sons, 2011.
- [6] S. Lampreia, J. Requeijo, J. Dias, V. Vairinhos.  $T^2$  Charts Applied to Mechanical Equipment Condition Control, International Conference on Intelligent Engineering Systems 2012-INES2012. Caparica, 2013.
- [7] S. Lampreia, V. Vairinhos, J. Dias, J. Requeijo. Vibrations Detection and Analysis in Equipment's with *MCUSUM* Charts and Frequencies Graphs, IRF2013, 2013.
- [8] D. C. Montgomery. *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade* (Introduction to Quality Statistical Control). USA: John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [9] C. Zou and F. Tsung. A Multivariate Sign *EWMA* Control Chart. *Technometrics*, 53, 84-97, 2011.
- [10] C. Sampaio. Curso de Manutenção por Controlo de Condição - 2ªParte (Condition Control Maintenance Course). *Manutenção*, 23-31, 1999.
- [11] M. Institute. *Manual do Curso Técnico Analista de Vibrações - Categoria II* (Technical Course Manual Vibration Analyst - Category II). SPECMAN, 2005.
- [12] R. Eshleman. *Basic Machinery Vibrations: An introduction to machine testing, analysis, and monitoring*. VIPress, 1999.
- [13] S. Crowder, S.. A Simple. Method for Studying Run Length Distributions of Exponentially Weighted Moving Average. *Technometrics*, 29, 155-162, 1989.



**GLOSSÁRIO**

Bem Reparável	"Um bem que, depois de uma avaria e sob determinadas condições, pode ser repostado num estado em que poderá desempenhar a função requerida." (NP EN13306, 2007)
Causa da avaria	"Razão que origina a avaria" (NP EN13306, 2007)
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." (NP EN13306, 2007)
Disponibilidade	"Aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo." (NP EN13306, 2007)
Em falha	"Estado de um bem inapto para cumprir uma função requerida, excluindo a inaptidão devida à manutenção preventiva ou outras acções programadas, ou devida à falta de recursos externos." (NP EN13306, 2007)
Pata Coxa	Desaperto nos apoios, desgaste nos apoios, danos nos apoios, ou apoios inapropriados.
Repetibilidade	Capacidade de um equipamento de medição, nas mesmas condições fornecer valores de medição análogos na medição repetida de uma característica de num mesmo produto (Pereira e Requeijo, 2012).
Reprodutibilidade	Variabilidade causada pelo fato de o equipamento ser usado por vários operadores na medição de um mesmo parâmetro (Pereira e Requeijo, 2012)
Shifts	Pequenas alterações nos valores do processo ou parâmetros dos equipamentos, podem ser aumentos reduções nos valores.
Manutibilidade	"Aptidão de um bem, sob condições de utilização definidas, para ser mantido ou restaurado, de tal modo que possa cumprir a função requerida, quando a manutenção é realizada em condições definidas, utilizando procedimentos e recursos prescritos." (NP EN13306, 2007)

