

TESIS DOCTORAL. FNB/UPC

Fecha: 05 de mayo de 2018

TÍTULO DE LA TESIS:

“Innovación y desarrollo tecnológico de los procesos y técnicas de mantenimiento para las válvulas en buques de última generación.”

Autor: Ángel Varela-Geis

Director de tesis: Dr. Eduard Montseny Masip

Co-Director de tesis: Dr. Ramón Grau Mur

Departamento: Ciencia e Ingeniería Náuticas (CEN)

Programa de doctorado en: Ingeniería Náutica, Marina y Radioelectrónica Naval

“Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya”

A las mujeres de mi vida

AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis es el resultado de la investigación realizada durante tres años y de mi experiencia profesional en las industrias Nuclear y Náutica que han sido fundamentales para lograr los objetivos planteados, que por otra parte no se habrían alcanzado sin el incondicional apoyo de las personas y empresas que menciono a continuación.

Un especial reconocimiento a mis directores de Tesis Dr Eduard Montseny Masip y Dr Ramón Grau Mur del Departamento de Ciencia e Ingeniería Náutica de la Facultad de Náutica de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña, cuya dedicación y conocimientos han sido imprescindibles para la consecución de este trabajo.

Al Ingeniero naval D. José M^a Laporta Pastor, Director del Servicio de pruebas de Tecnatom y a todos los ingenieros de las empresas que me han brindado su colaboración, entre las cuales debo citar a la Asociación Nuclear Ascó Vandellós, Tecnatom, Navantia, y Ringo Válvulas.

A los capitanes, jefes de máquinas y oficiales de todos los buques en los que he navegado y especialmente a los de los buques tanque LNG de Teekay Shiping que me brindaron su tiempo y su saber hacer.

A mi mujer, Tamara Martínez Jiménez, piloto de la Marina Mercante y Master en Ingeniería por L'École des Mines ParisTech, que siempre ha estado a mi lado con su afecto y con sus sabios consejos, tanto en el mundo de la Náutica como en el de la Ingeniería y la Física.

Finalmente, a mis hijas Paula y Marta, que han tenido siempre la palabra de apoyo que necesitaba en el momento adecuado y me dan el cariño y la comprensión que necesito en cualquier circunstancia de la vida.

RESUMEN

Esta tesis analiza y fundamenta las nuevas aportaciones de la Ingeniería de mantenimiento sobre las válvulas motorizadas, así como las estrategias y tecnologías más adecuadas para garantizar el margen de seguridad operativa de las mismas.

Además de garantizar dicho margen de seguridad, la estrategia elegida deberá minimizar el mantenimiento correctivo a la vez que se realiza el menor mantenimiento preventivo posible. Esto parece casi una utopía, pero durante las últimas décadas la Ingeniería de mantenimiento ha desarrollado nuevas tecnologías para conseguirlo.

La tecnología de diagnóstico de válvulas ha hecho posible implementar un programa de mantenimiento basado en la condición, evitando los procedimientos más extensivos de mantenimiento preventivo, reduciendo los costes directos del Plan de Mantenimiento y limitando a su vez las indisponibilidades que pueden afectar a la seguridad y a la producción.

Por otro lado, es evidente que un barco propulsado por turbina de vapor es muy similar a una planta de energía con turbina de vapor respecto a sus sistemas de proceso, y lo es también bajo un punto de vista técnico en cuanto a sus equipos y válvulas.

Partiendo de estas evidencias, se ha proyectado la investigación de esta tesis con la meta de alcanzar los retos planteados a través de la suma de experiencias del autor tanto en el sector nuclear de generación eléctrica como en el sector naval.

El objetivo principal de esta tesis es demostrar la posibilidad de innovar en el sector naval con una nueva tecnología para el mantenimiento de válvulas motorizadas en los buques. Dicha tecnología, como mantenimiento basado en la condición, es la diagnosis de válvulas, la cual recomienda las acciones de mantenimiento predictivo basadas en la medida, la monitorización y el análisis de los parámetros fundamentales para la evaluación de su estado o condición.

Se propone, en consecuencia, la innovación en el sector naval a través de la aplicación de la tecnología de diagnóstico de válvulas y de las buenas prácticas de la industria de generación nuclear que han demostrado su efectividad.

La metodología seguida en esta tesis consiste, en primer lugar, en una necesaria clarificación de conceptos sobre Ingeniería de mantenimiento.

En segundo lugar, se realiza una investigación detallada del Estado del Arte sobre la estrategia de mantenimiento de las válvulas motorizadas desarrollada en las centrales nucleares de generación eléctrica. Dicha estrategia fue impulsada por la Nuclear Regulatory Commission y el Consejo de Seguridad Nuclear después del accidente de TMI (Three Miles Island). En el mismo capítulo se analiza, tanto la metodología utilizada y la actualización de las hipótesis de diseño, como la evolución de su Know-How en Ingeniería de mantenimiento, desarrollado entre 1989 y 2017.

En el capítulo III, se expone el análisis realizado sobre los sistemas de los buques estudiados y las válvulas actuadas que pueden ser objeto de diagnóstico, así como la justificación de dicha tecnología para solucionar las incertidumbres del mantenimiento preventivo por plazos.

Además, en el capítulo IV se concreta la propuesta de innovación y la metodología para la implantación de esta tecnología en la industria naval, así como la reducción de costes esperada y los beneficios inherentes sobre la seguridad y la producción por la reducción de las indisponibilidades de las válvulas motorizadas.

Finalmente, el Capítulo V recoge las conclusiones de la tesis y las propuestas para futuras investigaciones.

Palabras clave: Válvula motorizada, estrategia de mantenimiento, mantenimiento basado en la condición, prueba de diagnóstico, transferencia tecnológica.

ABSTRACT

This PhD thesis analyzes and sets the bases for the new contributions of maintenance engineering for motorized valves, as well as the most appropriate strategies and technologies to guarantee the operational safety margin.

Well-performed maintenance implies minimizing corrective maintenance while performing the least possible preventive maintenance. This might seem like a utopia, but during the last decades maintenance engineering has developed strategies and technologies to support it.

The valve diagnostic technology has allowed the implementation of a condition based maintenance program on the motor operated valves, avoiding the most extensive preventive maintenance procedures, reducing the direct costs of the Maintenance Plan and limiting the unavailabilities that can affect the safety and the production.

In addition, it should be clear that a ship driven by a steam turbine is very similar to a power plant with a steam turbine in terms of its process systems and it is also very similar from a technical point of view concerning its equipments and valves.

Based on this evidence, the research of this thesis has been projected in order to achieve the objectives through the sum of the author's experiences both in the nuclear power generation sector and in the naval sector.

The main objective of this PhD thesis is to demonstrate the possibility of innovating in the naval sector with a new technology for the motor operated valves maintenance on ships. This technology, as condition based maintenance, is the valve diagnosis test, which recommends predictive maintenance actions based on measurement, monitoring and analysis of the essential electrical and mechanical parameters for the evaluation of their condition.

Therefore, innovation in the naval sector is proposed through the application of valve diagnosis technology and the good practices of the nuclear power plants that have proven their effectiveness.

The methodology followed in this PhD thesis consists of, first of all, in a necessary clarification of maintenance engineering concepts.

Furthermore, a detailed investigation of the State of the Art is carried out on the motor operated valves program developed in the nuclear power plants. This programme was driven by the Nuclear Regulatory Commission and the Nuclear Safety Council after the TMI accident (Three Mile Island). In the same chapter, the methodology used and the design hypotheses updates have been analyzed. Additionally, the evolution of its Know-How in Maintenance Engineering developed between 1989 and 2017 has been studied.

In chapter III, the analysis of the systems of the ships studied and their actuated valves that can be object of diagnosis is presented, as well as the justification of this technology to solve the uncertainties of the preventive maintenance by periods.

Moreover, chapter IV specifies the innovation proposal and the methodology for the implementation of this technology in the naval industry. It also deals with the expected cost reduction and the inherent benefits on the safety and the production by reducing the unavailabilities of the motorized valves.

Finally, Chapter V includes the conclusions of the PhD thesis and the proposals for future research.

Keywords: motor operated valve, maintenance strategy, condition based maintenance, diagnostic test, technological transfer.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
CONTENIDO	VII
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABLAS	XVII
LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	XIX
GLOSARIO	XXI
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS.....	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. Evolución del Mantenimiento	1
1.1.2. El Mantenimiento y la Ingeniería de Mantenimiento.....	2
1.1.3. Innovación y Desarrollo	4
1.1.4. Mantenimiento y el ciclo de vida	6
1.1.5. El futuro del Mantenimiento	6
1.2. Motivación y Objetivos	6
1.3. Estructura de la tesis.....	9
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1. Conceptos de mantenimiento	12
2.1.1. Conceptos fundamentales.....	12
2.1.2. Estrategia de mantenimiento	13
2.1.3. Mantenimiento basado en la condición	13
2.1.4. La medida de la Condición y sus parámetros.....	14
2.1.5. Mantenimiento centrado en la Fiabilidad.....	20
2.1.6. Diagnos de Válvulas Motorizadas	21
2.2. Antecedentes (Background) sobre la diagnosis de las MOV	26
2.2.1. Evolución histórica de la diagnosis de válvulas en centrales nucleares	26

2.2.2.	Problemas detectados en las válvulas actuadas	27
2.2.3.	Propuesta a los problemas detectados	27
2.2.4.	Objetivo del Performance Prediction Program (PPP)	28
2.3.	Estado actual de la diagnosis de válvulas.....	29
2.3.1.	Situación actual del mantenimiento de válvulas motorizadas en centrales nucleares de generación eléctrica.....	29
2.3.2.	Situación actual del mantenimiento de válvulas motorizadas en los buques	34
2.4.	Descripción, mantenimiento y comprobaciones de una MOV.....	42
2.5.	Métodos, técnicas, equipos e informes de diagnosis para una MOV	42
2.5.1.	Métodos de diagnosis con medidas de parámetros mecánicos.....	43
2.5.2.	Métodos de diagnosis basados en la medida directa de parámetros eléctricos....	48
2.5.3.	Monitorización permanente del sistema de diagnosis	50
2.5.4.	Precisión de los distintos métodos de diagnosis.....	52
2.5.5.	Equipos de diagnosis para la adquisición y análisis de datos.....	54
2.5.6.	Fabricantes de los equipos de diagnosis para MOV.....	56
2.5.7.	Informe de diagnosis y criterios de aceptación	57
2.6.	Evolución de las hipótesis de diseño para la diagnosis de las MOV.....	58
2.6.1.	Respuesta al accidente de TMI.....	59
2.6.2.	Programa de Westinghouse	60
2.6.3.	Las pruebas dinámicas	60
2.6.4.	GL 89-10	60
2.6.5.	GL 96-05	61
2.6.6.	Metodología del informe MPR2524A.....	61
2.6.7.	Revisión de las hipótesis de diseño	62
2.7.	Optimización y planificación a largo plazo de la diagnosis de las MOV.....	63
2.7.1.	Planificación inicial.....	64
2.7.2.	Introducción en el Mantenimiento Preventivo de las Bases de datos de las Plantillas por componentes de EPRI	65
2.7.3.	Planificación a largo plazo	67

2.8. Metodología seguida para la implantación de la diagnosis en las MOV en las centrales nucleares	69
2.8.1. Requisitos previos para la implantación de la diagnosis en las MOV.....	70
2.8.2. Metodología de diagnosis para la verificación del estado de las MOV	71
2.8.3. Seguimiento de la Condición de las MOV	73
2.8.4. Plan de mantenimiento de las MOV con la estrategia CBM.....	73
CAPÍTULO III. Análisis de las válvulas en los sistemas del buque	75
3.1. Introducción sobre los tipos de actuadores.....	75
3.2. Tipos de actuadores y válvulas en los buques.....	77
3.3. Características del buque.....	78
3.3.1. Características principales de los buques analizados	78
3.3.2. Diferencias fundamentales entre los buques analizados	80
3.3.3. Imagen de los buques estudiados	81
3.4. Análisis de los sistemas del buque	83
3.4.1. Buque LNG Catalunya Spirit	83
3.4.2. Buque LNG Hispania Spirit	85
3.4.3. Buque RO-RO J.M. Entrecanales.....	87
3.4.4. Resumen de válvulas actuadas por tipo de buque	91
3.5. Imágenes de los distintos tipos de válvulas instaladas en los buques	93
3.6. Similitud entre válvulas actuadas en centrales de energía y en los buques.....	97
3.7. Justificación de la diagnosis de válvulas motorizadas en los buques.....	98
3.7.1. Las incertidumbres del mantenimiento preventivo	98
3.7.2. La diagnosis de válvulas como solución a las incertidumbres del mantenimiento preventivo.....	100
CAPÍTULO IV. Sistemas de diagnosis de válvulas propuestos durante el Ciclo de Vida del buque	103
4.1. Evaluación del impacto previsto con la aplicación de las estrategias de CBM.....	103
4.2. Relación entre el Ciclo de Vida y la Ingeniería de Mantenimiento	104
4.3. Criterios de selección de las MOV que pueden ser objeto de diagnosis	105
4.4. Fallos potenciales y tipos de diagnosis para cada fase del Ciclo de Vida.....	106

4.4.1.	Fallos potenciales en las MOV.....	106
4.4.2.	Tipos de diagnosis aplicables en las MOV de los buques.....	107
4.4.3.	Tabla de fallos posibles y Métodos de diagnosis propuestos para su detección	107
4.4.4.	Métodos de diagnosis propuestos para cada fase del ciclo de vida.....	108
4.5.	Metodología para la implantación de la tecnología de diagnosis en un buque	109
4.5.1.	Metodología para la implantación en un buque de nueva construcción.....	109
4.5.2.	Inconvenientes que pueden presentarse durante la implantación en un buque en explotación	110
4.6.	Los costes y beneficios del mantenimiento CBM.....	111
4.6.1.	Las ventajas de la estrategia del mantenimiento CBM	111
4.6.2.	Los costes directos del mantenimiento CBM.....	112
4.6.3.	Los beneficios del mantenimiento CBM respecto a las indisponibilidades con pérdida de productividad.....	113
4.6.4.	Los costes de la tecnología de diagnosis desde el CCM	114
4.6.5.	Estudio de las indisponibilidades de las MOV en una central nuclear.....	115
4.6.6.	Análisis de costes del Plan de Mantenimiento con la utilización de la tecnología de diagnosis en las MOV	116
4.6.7.	Otros aspectos sobre los costes	118
CAPÍTULO V. Conclusiones		119
5.1.	Sobre la propuesta de tesis	119
5.2.	Los objetivos alcanzados.....	119
5.3.	Conclusiones	120
5.4.	Reflexiones sobre futuras investigaciones	121
TRABAJOS CITADOS.....		123
OTRAS REFERENCIAS		127
ANEXO 1 DESCRIPCIÓN Y COMPROBACIONES EN UNA MOV		131
A.1.	Descripción y Comprobaciones en una MOV	131
A.1.1.	Descripción general.....	131
A.1.2.	Comprobaciones.....	139
A.1.3.	Ajuste de los interruptores final de carrera.....	141

A.1.4. Comprobación del motor.....	143
A.1.5. Comprobación de los interruptores de par.....	144
A.1.6. Ajustes de los interruptores de par	146
A.1.7. Esquemas eléctricos	148
A.1.8. Diagrama típico de una curva Esfuerzo-Tiempo.....	150
ANEXO 2 HOJAS DE DATOS E INFORMES DE DIAGNOSIS	153
A.2.1. Metodología de cálculo de los esfuerzos en el eje de la válvula	153
A.2.2. Hoja de Datos de Ingeniería	153
A.2.2. Informe de Diagnóstico de Tecnatom.....	155
ANEXO 3 PUBLICACIONES Y PONENCIAS	167
A.3.1. Towards New Technology in Valve Maintenance	167
A.3.2. Innovación y Transferencia Tecnológica en Ingeniería Mantenimiento de Válvulas	167

LISTA DE FIGURAS

Figure 1 : Cambio del RCP durante el tiempo de operación	16
Figure 2 : Curva de tendencia de la Tasa de Supervivencia	17
Figure 3 : Cambio del RCI durante el tiempo de operación.	18
Figure 4 : Valores de diagnosis en un instante.	19
Figure 5 : Relación RCM-CBM-Tecnología diagnosis	24
Figure 6 : Estrategias de Mantenimiento / Fiabilidad y Disponibilidad	25
Figure 7 : Sistema de medida con sensor de par.....	44
Figure 8: Posición montaje galgas extensiométricas en eje.....	45
Figure 9 : Esquema montaje galgas extensiométricas en eje.....	46
Figure 10 : Posición montaje galgas extensiométricas en yugo	47
Figure 11 : Esquema de bloques toma de datos.....	49
Figura 12 : Esquema de monitorización on-line.....	51
Figure 13 : Buque LNG. Catalunya Spirit.....	81
Figure 14 : Buque LNG Hispania Spirit.....	82
Figure 15: Buque JM. Entrecanales.....	82
Figure 16 : Identificación válvulas a bordo LNG Catalunya Spirit.....	93
Figure 17: Posición montaje galgas extensiométricas en eje.....	94
Figure 18: Válvula mariposa motorizada. Hispania Spirit	95
Figure 19 : Válvula neumática. Hispania Spirit.....	95
Figure 20 : Actuador eléctrico de válvula mariposa Catalunya Spirit.....	96
Figure 21 : Válvula mariposa con actuador eléctrico Hispania Spirit	96

Figure 22 : Costes de Tareas de mantenimiento MOV.....	116
Figure 23 : Conjunto válvula-actuador.....	132
Figure 24 : Válvula de compuerta	134
Figure 25 : Actuador Limitorque SMB	135
Figure 26 : Esquema actuador	136
Figure 27 : Despiece Actuador SMB.....	138
Figure 28 : Caja de engranajes de interruptores fin de carrera	139
Figure 29: Frontal del tren de engranajes del fin de carrera	140
Figure 30 : Ajustes de fin de carrera « abierto».....	141
Figure 31 : Ajuste de fin de carrera « cerrado »	142
Figure 32 : Identificación de los interruptores de par.....	144
Figure 33 : Medida del valor actual del limitador de par.....	145
Figure 34 : Comprobación de los contactos de los interruptores de par.....	146
Figure 35 : Ajuste de los interruptores de par.....	148
Figure 36 : Esquema general eléctrico.....	149
Figure 37 : Curva esfuerzo-tiempo	151
Figure 38 : Hoja datos MOV de compuerta.....	154
Figure 39: Informe diagnosis AS FOUND de MOV de compuerta	155
Figure 40 : Informe diagnosis AS LEFT de MOV de compuerta.....	156
Figure 41 : Gráficas orientativas para la interpretación de las curvas de diagnosis de una MOV de compuerta	157
Figure 42 : Valores eléctricos respecto de la posición SpringPack	158
Figure 43 : Valores de empuje y par e indicadores posición	159

Figure 44 : Valores eléctricos y CST respecto Springpack	160
Figure 45 : Valores empuje y par, luz posición y TRP	161
Figure 46 : Valores eléctricos respecto de la posición SpringPack	162
Figure 47 : Valores empuje, par y luz indicación	163
Figure 48 : Valores intensidad y luz indicación verde.....	164
Figure 49 : Marcadores posición respecto a curva completa de cierre y apertura	165

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 : Tipos de reconocimiento.	38
Tabla 2 : Tabla de precisiones y aplicación para los métodos de medida	53
Tabla 3 : Plantilla PM de ANAV	69
Tabla 4 : Características principales de los buques	79
Tabla 5: Diferencias de los buques analizados	80
Tabla 6 : Clasificación válvulas Catalunya Spirit.....	84
Tabla 7 : Clasificación válvulas Hispania Spirit.....	86
Tabla 8 : Clasificación válvulas RO-RO	88
Tabla 9 : Válvulas en buques LNG actuadas con distinto actuador	91
Tabla 10 : Comparativa entre válvulas actuadas por buque	92
Tabla 11 : Tabla de fallos y métodos de detección.....	108

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

Todos estos acrónimos aparecen a pie de página a lo largo del texto.

ABS: American Bureau of Shipping.

ACV: Apoyo Ciclo Vida

AENOR: Asociación Española de Normalización

ANAV: Asociación Nuclear Asco Vandellos

AOV: Air Operate Valve

CBM: Condition Based Maintenance.

CCM: Centro control de Motores

CCW: Indicador engranaje anti-horario

CCW: Counter Clock Wise

CFR: Code of Federal Regulations

CSN: Consejo Seguridad Nuclear

CW: Indicador engranaje horario

CWD: Control Wire Diagrams (Diagrama Control Cableado)

DTI: Departamento de Industria Británico

EPRI: Electric Power Research Institute

ESC (SSC): Estructura, Sistema, Componente. (Structure, System, Component)

GL: Generic Letter

IACS: International Association of Classification Societies

IRD: IRD Mechanalysis

JOG: Joint Owners Group

LNG: Liquefied Natural Gas

MBA: Maintenance Benefit Analysis

MOV: Motor Operate Valve

MPR: Maintenance Preventive Report

MR: Regla de Mantenimineto

NRC: Nuclear Regulatory Commission.

NUMAC: Nuclear Maintenance Applications Center

OMI: Organización Marítima Internacional

PPP: Performance Prediction Programe EPRI

RCI:Relevant Condition Indicator

RCM: Reliability Centred Maintenance.

RCP: Relevant Condition Predictor

RO-RO: Roll-On/Roll-Off

SOLAS: Safety of Life at Sea

SNE: Sociedad Nuclear Española

TMI: Three Mile Island

GLOSARIO

Dentro de la amplia bibliografía que ha tratado los temas de Ingeniería de mantenimiento en los últimos años, podemos encontrar diferentes matices para las mismas definiciones y por ello nos remitimos a la norma mencionada a continuación.

La terminología que se utiliza en este trabajo se basa fundamentalmente en la última revisión de la norma UNE-EN 13306 de marzo de 2011 y en el Informe del profesor Ramón Grau Mur sobre terminología de Mantenimiento.[1]

Los términos utilizados se han numerado como referencia cruzada dentro del texto.

Definimos únicamente los términos utilizados en esta tesis:

1. **Activo físico:** elemento contabilizable formalmente.
2. **Análisis de fallos:** Examen lógico y sistemático de los modos de fallo del elemento y de las causas, antes o después de un fallo, para identificar las consecuencias del fallo así como la probabilidad de su ocurrencia.
3. **Ciclo de vida:** Serie de estados por los que pasa un elemento desde su concepción hasta su eliminación.
4. **Condición de un elemento o ESC:** cuando se hace referencia a la Condición de un elemento referido a la estrategia del CBM o Mantenimiento Basado en la Condición, se debe entender como el estado del elemento respecto de sus características funcionales.
5. **Criticidad:** (de un fallo o de una avería) Índice numérico de la severidad de un fallo o de una avería combinado con la probabilidad o frecuencia de su ocurrencia.
6. **Diagnóstico de averías:** Acciones que se realizan para el reconocimiento de una avería, la localización de una avería y la identificación de las causas.
7. **Disponibilidad:** Aptitud de un elemento para encontrarse en un estado en que pueda realizar su función, cuándo y cómo se requiera, bajo condiciones dadas, asumiendo que se dispone de los recursos externos necesarios.
8. **Elemento ESC:** Estructura, parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que puede describirse y considerarse de forma individual.
9. **Estrategia:** Método de gestión utilizado para lograr los objetivos del mantenimiento.
10. **Fallo:** Cese de la aptitud de un elemento para realizar una función requerida.
11. **Fiabilidad:** aptitud de un elemento de realizar una función requerida bajo unas condiciones determinadas durante un intervalo de tiempo dado.
12. **Ingeniería de mantenimiento:** según los autores de la obra Ingeniería de Mantenimiento [2], permite gestionar eficaz y eficientemente la fiabilidad,

- conservación, preservación, disponibilidad y desempeño de los activos físicos de la empresa.
13. **Mantenibilidad:** Capacidad de un elemento bajo condiciones de utilización dadas, de ser preservado, o ser devuelto a un estado en el que pueda realizar una función requerida, cuando el mantenimiento se ejecuta bajo condiciones dadas y utilizando procedimientos y recursos establecidos.
 14. **Mantenimiento:** Combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión realizadas durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o a devolverlo a un estado en el que pueda desempeñar la función requerida.
 15. **Mantenimiento basado en la condición:** Mantenimiento preventivo que incluye una combinación de monitorización de la condición y/o la inspección y/o los ensayos, análisis y las consiguientes acciones de mantenimiento.
 16. **Mantenimiento basado en la fiabilidad:** RCM,
 17. **Mantenimiento correctivo:** Mantenimiento que se realiza después del reconocimiento de una avería y que está destinado a poner a un elemento en un estado en que pueda realizar una función requerida.
 18. **Mantenimiento preventivo:** Mantenimiento que se realiza a intervalos predeterminados o de acuerdo con criterios establecidos, y que está destinado a reducir la probabilidad de fallo o la degradación del funcionamiento de un elemento.
 19. **Mantenimiento predictivo:** Mantenimiento basado en la condición que se realiza siguiendo una predicción obtenida de un análisis repetido o de características conocidas y de la evaluación de los parámetros significativos de la degradación del elemento.
 20. **Margen de seguridad:** ver Tasa de supervivencia.
 21. **Método:** Un método de mantenimiento es un modo ordenado y sistemático de proceder para llegar a un resultado o fin determinado.
 22. **Metodología:** Una metodología puede definirse como el estudio o elección de un método pertinente o adecuadamente aplicable a determinado objeto. También puede definirse como una serie de métodos o técnicas de rigor científico que se aplican sistemáticamente durante un proceso para alcanzar un resultado válido.
 23. **Protocolo de mantenimiento** [3]: Según IRIM, Es un listado de tareas a realizar en un tipo concreto de equipo. Dichas tareas pueden definirse en uno o varios procedimientos que especifiquen el alcance y las técnicas utilizadas.
 24. **Plan de mantenimiento:** Es el conjunto de tareas de mantenimiento preventivo a realizar en una instalación.
 25. **RCI:** Relevant Condition Indicator (Indicador adecuado de la Condición) según Jezdimir Knezevic.[4]
 26. **RCP:** Relevant Condition Predictor (Estimador adecuado de la Condición) según Jezdimir Knezevic [4]
 27. **Seguridad de funcionamiento:** Capacidad de funcionar cómo y cuándo se requiera.

28. **Tarea:** Es el trabajo correspondiente al alcance definido en un procedimiento de mantenimiento que incluye las técnicas utilizadas y toda la información necesaria para ejecutarlo. Suele estar definida por su frecuencia de aplicación en el sistema de gestión de mantenimiento.
29. **Tasa de supervivencia:** es la tasa de vida ante el fallo.
30. **Técnica:** es un procedimiento o conjunto de reglas, normas o protocolos cuyo objetivo es obtener un resultado predeterminado, sea en el campo de las ciencias y tecnologías, de la acción ración racional o el de cualquier actividad manual o intelectual. Todas las tecnologías usan técnicas de algún tipo, pero una técnica no es una tecnología, sino sólo una parte de ella.[4]
31. **Tecnología:** puede definirse como la recopilación de técnicas, habilidades, métodos y procesos utilizados en la producción de bienes o servicios o en el cumplimiento de objetivos, como la investigación científica.
32. **Tecnología de diagnosis de válvulas:** es un conjunto de conocimientos científicos del campo de la ingeniería de sistemas y del mantenimiento predictivo de válvulas que utiliza una metodología de verificación y análisis con técnicas específicas de medida de parámetros físicos para comprobar el estado o condición de las válvulas actuadas y predecir el margen de seguridad o tasa de vida ante el fallo.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS

En el presente capítulo se introduce claramente la situación de la diagnosis de válvulas como tecnología (31) dentro del mantenimiento, así como los objetivos de esta investigación y la estructura de los capítulos de la tesis y su alcance. Además, ha sido necesario aclarar algunos conceptos y definiciones que no siempre son tratados de igual forma por los diferentes autores de la bibliografía de mantenimiento.

1.1. Introducción

En este apartado se introducen los conceptos básicos tratados en esta tesis, se expone la evolución del mantenimiento hacia la Ingeniería de mantenimiento (12) y la relevancia de la Innovación y el Desarrollo para la implantación de nuevos avances en investigación de ciencia aplicada o ciencia ingenieril [5] en la ingeniería de mantenimiento.

En particular, en el capítulo II “Estado del Arte”, se adoptan las definiciones, que aúnan el mayor consenso entre los científicos, de los principales conceptos de estrategia, metodología, tecnología y técnica que se utilizan en el mantenimiento en general y específicamente en el mantenimiento basado en la condición. [2]

1.1.1. Evolución del Mantenimiento

Como evolución histórica del Mantenimiento (14) podemos acordar que la mayoría de los autores asignan el mayor impacto evolutivo de esta ciencia al gran salto realizado desde la revolución industrial y al efecto que tuvieron las contiendas correspondientes a la primera y segunda guerras mundiales.

La evolución del Mantenimiento se puede sintetizar en las siguientes etapas con sus correspondientes estrategias. [6]

- Primera etapa hasta 1950. Se utiliza el mantenimiento correctivo (17).
- Segunda etapa hasta mediados de los 70. Se introducen el mantenimiento preventivo (18), los métodos de planificación y control del mantenimiento y la utilización de la informática de gestión. Nuevas técnicas de control y calidad.

- Tercera etapa desde finales de los 70 hasta nuestros días. Aparece el RCM¹(16) o mantenimiento centrado en la fiabilidad, y el CBM²(15) o mantenimiento basado en la condición. Se priorizan en el diseño de sistemas y equipos la fiabilidad y la mantenibilidad (13), el análisis de riesgos y el análisis de fallos. Se utilizan los sistemas expertos y la informática con potentes ordenadores de gestión, control y análisis de resultados.

Por otra parte, los organismos reguladores a raíz del análisis y conclusiones de accidentes e incidentes como Amoco Cadiz, Chernobyl, Three miles Island, entre otros, incrementan las regulaciones y normativas con nuevas exigencias de seguridad y fiabilidad.

También conviene señalar que la industria militar, la aeroespacial y la nuclear en su rama industrial de generación de energía, han sido y continúan siendo líderes en el desarrollo de las tecnologías y metodologías de mantenimiento, así como en su normativa.

A raíz del impulso de la industria de la energía nuclear y sus reguladores, fue cuando apareció la tecnología de diagnóstico de válvulas como Mantenimiento basado en la condición[7].

1.1.2. El Mantenimiento y la Ingeniería de Mantenimiento

Si bien es cierto que durante siglos el Mantenimiento se ha fundamentado en la experiencia o conocimiento empírico y el buen hacer de artesanos y maestros, hoy en día ha evolucionado de forma exponencial hacia nuevas tecnologías y conocimientos científicos que exigen la formación cualificada de técnicos e ingenieros.

Además, el Mantenimiento como actividad de servicio industrial es tan antiguo como los dispositivos de producción, sin embargo, el concepto de Ingeniería de Mantenimiento es relativamente reciente.[8]

¹ RCM: Reliability Centred Maintenance

² CBM: Condition Based Maintenance

El concepto de Mantenimiento, según Jezdimir Knezevic, incluye todas las tareas que realiza el usuario para conservar el elemento o sistema en el estado SoFu³, o para recuperarlo a ese estado.[1]

Por otro lado, según se define en la norma UNE-EN-13306 [9], por mantenimiento se entiende una combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual puede desarrollar una función requerida.

La Ingeniería de Mantenimiento, según los autores de la obra Ingeniería de Mantenimiento [2], permite gestionar eficaz y eficientemente la fiabilidad, conservación, preservación, disponibilidad y desempeño de los activos físicos de la empresa.

Las actividades de la Ingeniería de Mantenimiento empiezan en la fase de concepción de un equipo o sistema y continúan a través del ciclo de vida, mientras que las actividades de mantenimiento empiezan con el inicio de la instalación del equipo o sistema y continúan hasta su desmantelamiento.[10]

Por ello, al margen del concepto global de Mantenimiento, conviene precisar que actualmente es necesario hablar de Ingeniería de Mantenimiento, la cual sustenta la investigación y el desarrollo del mantenimiento con profusión de conocimientos científicos.

La Ingeniería de Mantenimiento toma cuerpo de doctrina como especialidad de la ingeniería desde los últimos 20 años. En este sentido, los autores del libro mencionado más arriba, señalan que dicha especialidad de ingeniería está constituida por una serie de tecnologías específicas de mantenimiento como los sistemas de monitorización y conocimiento de la condición y con técnicas de ayuda al diagnóstico, entre otras.

Por lo expuesto anteriormente, se puede afirmar que la diagnosis de válvulas (32) es una tecnología innovadora para la predicción y el análisis del estado de las válvulas motorizadas y neumáticas que exige una alta especialización de ingenieros y técnicos.

³ SoFu: State of functional (Estado de funcionamiento)

1.1.3. Innovación y Desarrollo

Es necesario señalar que, para esta tesis, son factores fundamentales la innovación y el desarrollo tecnológico y científico, y en consecuencia dichos conceptos también son objeto de matización. [11]

1.1.3.1. Innovación

La principal diferencia entre innovación e invención estriba en que para que exista innovación se necesita éxito; sin embargo, no es necesario este requisito para que se dé la invención. Normalmente, la invención es un concepto previo a la innovación.

Tal como se anticipa en el preámbulo de este capítulo, la definición de Innovación nos conduce a distintas acepciones.

Las teorías de lo que es o no innovación se derivan, esencialmente, de la definición aportada por Schumpeter en 1934, economista austriaco que fue el primero en destacar la importancia de los fenómenos tecnológicos en el crecimiento económico. Schumpeter definió la innovación en un sentido más general que el de las innovaciones específicamente tecnológicas.

Por otro lado, el Departamento de Industria Británico (DTI) definió la innovación como la explotación de una idea con éxito. Se trata de aplicar de manera eficaz y creativa conocimientos, métodos o técnicas ya existentes para desarrollar una idea que sea aceptada por el mercado.

Según el *Libro verde de la innovación* [12], “innovación” es sinónimo de producir, asimilar y explotar con éxito una novedad, en las esferas económica y social, de modo que aporte soluciones inéditas a los problemas y permita así responder a las necesidades de las personas y de la sociedad.

Innovación tecnológica *Manual de Oslo*. [13]: es la conversión de conocimiento tecnológico en nuevos productos, nuevos servicios o procesos para su introducción en el mercado, así como los cambios tecnológicamente significativos en los productos, servicios y procesos.

Lo fundamental en cualquiera de las definiciones expuestas es el concepto de aportar soluciones, tecnologías, métodos y técnicas ya existentes, que permitan soluciones inéditas a problemas existentes en el mercado y que hayan demostrado su eficiencia.

1.1.3.2. Desarrollo

Desde 1963 existe un consenso internacional sobre lo que es y lo que no es I+D, ya que en junio de ese año, se reunieron en Frascati, un pueblo de las afueras de Roma, un grupo de expertos en estadísticas de investigación y desarrollo, convocados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), y redactaron un manual para realizar las encuestas y establecer las estadísticas de I+D.

Por su parte, la vertiente fiscal se basa, sin coincidir plenamente, en las definiciones del *Manual de Frascati* [14] y del *Manual de Oslo* [13]:

- a) Investigación, *Manual de Frascati*. [14] : actividad cuyos fines se circunscriben al incremento del conocimiento, sin perseguir, en principio, aplicación específica del resultado.
- b) Desarrollo, *Manual de Frascati*. 1994 [14] : es el trabajo sistemático, basado en el conocimiento derivado de la investigación y la experiencia, que está dirigido a producir nuevos materiales, productos y servicios; a instalar nuevos materiales, productos y servicios, o a mejorar sustancialmente aquellos previamente producidos o instalados.

Antes de terminar con esta introducción hay que mencionar la exigencia de innovación y desarrollo impulsada por la industria nuclear a través de las investigaciones realizadas por el EPRI⁴ [15] a raíz del accidente de Three Miles Island y a instancias de la NRC⁵ Dicha exigencia se concretó con la aplicación de la metodología del RCM⁶ y del Mantenimiento Basado en la Condición, así como con el desarrollo de la Diagnósis de válvulas.[6]

⁴ EPRI: Electric Power Research Institute

⁵ NRC: Nuclear Regulatory Commission

⁶ RCM: Reliability Centred Maintenance

En otros sectores industriales se han desarrollado sistemas de diagnóstico para los equipos y sistemas más relevantes para la producción, pero ha sido en la industria nuclear de producción de energía donde se ha utilizado la tecnología de diagnóstico de válvulas (32) redundando en la mayor seguridad (23) y fiabilidad (11) de los sistemas.

1.1.4. Mantenimiento y el ciclo de vida

Para finalizar, hay que concretar la relación entre la Ingeniería de mantenimiento y el ciclo de vida. (3)

Según AENOR [9] Ciclo de vida es la serie de estados por los que pasa un elemento desde su concepción hasta su eliminación. Pues bien, la estrategia (9) de mantenimiento debe tenerse en consideración desde la fase de diseño del sistema o equipo, durante todo su ciclo de vida hasta la caducidad del mismo.

1.1.5. El futuro del Mantenimiento

En un futuro inmediato, se puede anticipar que la evolución del Mantenimiento acompañará a la Smart industry o Industria 4.0 con la utilización masiva de las tecnologías de diagnóstico con sistemas expertos y la inteligencia artificial como herramientas fundamentales para la detección y análisis del estado de los sistemas y equipos, para anticiparnos al fallo (10) y planificar la intervención aumentando la disponibilidad (7) y la producción. [16]

1.2. Motivación y Objetivos

En este apartado, además de exponer la motivación para la realización de esta tesis, se concretan el objetivo principal y los sub-objetivos que se analizan y desarrollan en los distintos capítulos.

1.2.1. Motivación

El autor de esta tesis realizó casi toda su carrera profesional en el sector energético y específicamente, durante casi treinta años, en Ingeniería de diseño, construcción y explotación de centrales nucleares en España y Francia. Esta experiencia consolidó una sólida formación internacional en nuevas metodologías y estrategias, así como en

innovadoras tecnologías impulsadas por un sector como el nuclear que siempre ha estado en las posiciones más exigentes respecto de la seguridad y la fiabilidad de sus instalaciones. También es cierto que disponer de los recursos necesarios en cualquier fase del proyecto y explotación de una central facilita alcanzar la más alta cota de calidad en todos sus aspectos, así como la consecución de la máxima eficiencia en ingeniería de mantenimiento.

Posteriormente, desde el 2004 hasta el 2014, el autor se licenció en navegación y se diplomó en máquinas navales para dedicarse a navegar en la marina mercante, como oficial de puente y de máquinas, en distintos tipos de buques. Durante esos años se pudo comprobar que en este sector industrial las metodologías de trabajo varían sustancialmente en función de si se trata de buques pesqueros o de buques de la Marina mercante y que dentro de esta última hay diferencias evidentes en sus metodologías y políticas de mantenimiento condicionadas por múltiples factores como el Estado de bandera y las prácticas de los distintos armadores.

Por otro lado, las vivencias profesionales adquiridas en los distintos buques, constatando las limitaciones de recursos tanto humanos como técnicos, en circunstancias difíciles para conseguir el apoyo externo de medios y mano de obra especializada, le aportaron al autor de esta tesis otro tipo de experiencias que pusieron en valor la cualificación de los oficiales y su buen hacer para solventar los problemas de forma eficaz. Además, durante los distintos embarques se comprobaron las limitaciones anteriormente mencionadas que se tienen a bordo y la posibilidad de aportar avances tecnológicos que facilitarían el cumplimiento de sus objetivos en ingeniería de mantenimiento redundando, a su vez, en la seguridad de las personas y del buque, así como en la disponibilidad del mismo.

A raíz de ambas experiencias profesionales, se consolidó la idea de esta investigación y como consecuencia de ello, se pudo verificar que la tecnología de diagnóstico de válvulas motorizadas no ha llegado a utilizarse como CBM a bordo de los buques, ni como Ingeniería de mantenimiento en los astilleros.

Por otra parte, también se corroboró la gran similitud existente entre una instalación energética y un buque, tanto en los sistemas, equipos y válvulas, como en las paradas para la recarga de una planta o en las paradas para los reconocimientos del buque.

Posteriormente, a partir de 2014 se inició la investigación sobre la diagnosis de válvulas motorizadas en la industria nuclear así como de sus resultados, certificando su continua evolución desde el año 1989 y recogiendo su Know-How.

La suma de ambas experiencias profesionales y las similitudes entre los requisitos normativos y en las estrategias de mantenimiento, evidenció que no sólo es posible, sino también altamente recomendable, la innovación en el sector naval con la tecnología de diagnosis de válvulas para la mejora de la fiabilidad de las MOV y de la seguridad en los buques.

1.2.2. Objetivo

Mejora de la seguridad (20) y la fiabilidad (11) de los sistemas del buque a través de la transferencia tecnológica de las estrategias de mantenimiento de válvulas basadas en la condición de las mismas e incorporando la tecnología de diagnosis.

1.2.3. Sub-objetivos

El objetivo principal se ha desglosado en los siguientes sub-objetivos:

- Estudio y análisis de las distintas tecnologías de diagnosis para la “vigilancia de la condición” con el fin de asegurar la fiabilidad y disponibilidad de las MOV⁷.
- Investigación sobre la mejora del índice de fallos e indisponibilidades de operación de los sistemas.
- Estudio y análisis de los sistemas del buque, para determinar el alcance y las estrategias de mantenimiento aplicables en las válvulas motorizadas.
- Investigación y propuesta de las diferentes tecnologías de diagnosis de válvulas aplicables durante el ciclo de vida de los buques.
- Evaluación del impacto previsto en la aplicación de las nuevas tecnologías en las estrategias de mantenimiento del buque.

⁷ MOV: Motor Operate Valve

1.3. Estructura de la tesis

La investigación para esta tesis ha sido larga y tenaz, con el propósito de establecer claramente el Estado del Arte en ambos sectores industriales y formando el cuerpo principal de esta tesis en el Capítulo II.

En los Capítulos III y IV se expone la propuesta final de implantación de la tecnología de diagnóstico de válvulas en el sector naval. Se termina con la exposición de las conclusiones en el Capítulo V.

El alcance de los Capítulos de esta tesis es el siguiente:

Capítulo 1: Introducción y objetivos de la tesis

En este capítulo se presenta la evolución histórica de las estrategias de mantenimiento, lo cual es imprescindible para poder establecer la aparición de nuevas tecnologías como la diagnosis de válvulas, y la relación entre la Ingeniería de mantenimiento y el ciclo de vida. Así mismo, se definen los objetivos y la estructura de la tesis. También expone la motivación del autor para esta investigación.

Capítulo 2: Estado del Arte

En este capítulo se expone el resultado de la investigación sobre los conceptos, las estrategias y las metodologías de mantenimiento y los antecedentes sobre la diagnosis de válvulas motorizadas.

Se establece, además, una comparación entre los diferentes requisitos de los organismos reguladores para cada una de las industrias y la evolución de la diagnosis de válvulas con el retorno de experiencia de las centrales nucleares.

Para finalizar, se detalla la tecnología de la diagnosis de válvulas como apoyo a la estrategia de mantenimiento centrado en la condición y las distintas técnicas en las que se basa para la predicción del estado de la válvula.

Capítulo 3: Análisis de las válvulas y de los sistemas del buque

En este capítulo se ha hecho necesaria una breve introducción sobre los tipos de actuadores y válvulas que pueden encontrarse a bordo, para continuar con el análisis de los sistemas de los distintos buques estudiados y concluir con la identificación de las MOV sobre las cuales puede aplicarse la tecnología de diagnóstico y su justificación.

Capítulo 4: Sistemas de diagnóstico de válvulas propuestos durante el ciclo de vida del buque

A lo largo de este capítulo se pone de manifiesto, por un lado, la relación entre la Ingeniería de Mantenimiento y el Ciclo de vida del buque dentro del contexto de la utilización de la diagnóstico de válvulas, y por otro, la jerarquía de los fallos potenciales del conjunto válvula-actuador y la posibilidad de detección de los mismos con los distintos métodos de diagnóstico disponibles. También se determina la metodología y los inconvenientes para la implantación de la diagnóstico de válvulas en función del estado de avance del buque, ya sea en su fase de diseño como en la de explotación del mismo.

Finalmente, se estudian los costes y beneficios de la utilización de la tecnología de diagnóstico de las MOV en los buques.

Capítulo 5: Conclusiones

En el capítulo final se ponen de manifiesto los objetivos alcanzados en la tesis, las conclusiones y las propuestas para futuras investigaciones relacionadas con el tema.

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo expone detalladamente el Estado del Arte tanto en la industria de generación nuclear como en la naval.

En primer lugar, clarifica los conceptos fundamentales de mantenimiento ya que no todos los autores los definen de igual forma. Dichos conceptos nos ayudarán posteriormente a situar la tecnología de diagnóstico de válvulas como herramienta del mantenimiento centrado en la condición.

En segundo lugar, se exponen en el apartado 2.2, los antecedentes de la diagnosis de válvulas. Se analizan y detallan los argumentos técnicos e históricos de las diferentes estrategias de mantenimiento que justifican la decisión de adoptar el mantenimiento CBM en las válvulas MOV de las centrales nucleares.

A continuación, en el apartado 2.3, se presenta el Estado actual de la diagnosis. Seguidamente, se establece la situación del mantenimiento de las MOV en ambos sectores industriales después de las investigaciones realizadas tanto en centrales nucleares como en los astilleros, y con distintos armadores.

Más adelante, entre los apartados 2.4 y 2.5, se detallan la tecnología de diagnosis de válvulas como metodología de mantenimiento CBM⁸ y las distintas técnicas en las que se apoya para la predicción del estado de la válvula motorizada. También se expone la precisión de los distintos métodos de diagnosis empleados, así como los equipos y datos adquiridos con esta tecnología.

Además se presenta, en el apartado 2.6, la evolución y la metodología seguida por la Ingeniería de mantenimiento para la clasificación de las válvulas en las centrales nucleares, así como la planificación a largo plazo en el apartado 2.7.

Para finalizar se expone en el apartado 2.8, la metodología de implantación de la tecnología de diagnosis de válvulas en las centrales nucleares.

⁸ CBM: Condition Based Maintenance

2.1. Conceptos de mantenimiento

A continuación se introducen algunos conceptos básicos para enmarcar la diagnosis de válvulas como una nueva tecnología de mantenimiento basado en la condición dentro del plan de mantenimiento.

2.1.1. Conceptos fundamentales

Tal y como se ha mencionado al inicio de este capítulo y dado que los conceptos como estrategia, tecnología, método, metodología y técnica aparecen en esta tesis de forma recurrente, se hace imprescindible concretar dichos conceptos antes de sumergirnos en la lectura de la misma.

Entre las diferentes definiciones encontradas en numerosa bibliografía sobre mantenimiento, se ha decidido para esta tesis adoptar las establecidas por la norma UNE-EN-13306, otras han sido precisadas por el autor de la tesis y todas aparecen referenciadas en el Glosario.

En consecuencia, a partir de este apartado se adoptan dichas definiciones y aparecen en el Glosario los siguientes términos con su numeración de referencia cruzada:

- Estrategia (9)
- Método (21)
- Metodología (22)
- Tecnología (31)
- Tecnología de diagnosis de válvulas (32)
- Técnica (28)

El concepto de Tecnología ha evolucionado fundamentalmente a partir de la revolución industrial. Inicialmente pudo haber cierta confusión entre técnica y tecnología pero a día de hoy la mayoría de los autores aceptan que la Tecnología (31) puede definirse como aparece en este Glosario. La Tecnología de diagnosis de válvulas (32) es uno de los términos definidos por el autor de la tesis.

De igual forma, la comunidad científica acepta como definición de Técnica (28) la que aparece en este trabajo. Todas las tecnologías usan técnicas de algún tipo, pero una técnica no es una tecnología, sino sólo una parte de ella.[4]

2.1.2. Estrategia de mantenimiento

Una estrategia de mantenimiento es la decisión que adoptan los responsables de la gestión de una planta para dirigir su mantenimiento, haciendo que un grupo de tareas sean la base de la actividad de mantenimiento, y el resto de tareas esté supeditadas a ese tipo básico de tareas. Tal como se ha resumido en el capítulo I, es un método de gestión utilizado para lograr los objetivos del mantenimiento.

El autor García Garrido considera que existen al menos cinco estrategias de mantenimiento: [17]

- Estrategia correctiva, en la que la reparación de averías es la base del mantenimiento.
- Estrategia condicional, en la que es la realización de determinadas observaciones y pruebas la que dirige la actividad de mantenimiento.
- Estrategia sistemática, en la que el mantenimiento se basa en la realización de una serie de intervenciones programadas a lo largo de todo el año en cada uno de los equipos que componen la instalación.
- Estrategia de alta disponibilidad, en la que se busca tener operativa la instalación para producir el máximo tiempo posible, y por tanto, las tareas de mantenimiento han de agruparse necesariamente en unos periodos de tiempo muy determinados, con poca afección a la producción.
- Estrategia de alta disponibilidad y fiabilidad, en la que no solo se confía el buen estado de la instalación a la realización de tareas de mantenimiento, sino que es necesario aplicar otras técnicas en otros campos (la ingeniería, el análisis de averías, etc.) para garantizar simultáneamente una alta disponibilidad y una alta fiabilidad de las previsiones de producción.

2.1.3. Mantenimiento basado en la condición

Cuando en la década de los 50 fue introducido por primera vez el CBM por IRD Mechanalysis,[18] fue bautizado por ésta como “Mantenimiento Preventivo Basado en Condición” porque la diferencia con el mantenimiento Preventivo (18) tradicional o programado era que en vez de hacer intervenciones en los equipos a intervalos fijos se hacía basándose en la *condición* (4) en que se encontraba la máquina, es decir, actuar ante la evidencia de necesidad. Esto es Mantenimiento Basado en la Condición.

El Mantenimiento Basado en la Condición [19], es una estrategia de mantenimiento que tiene como objetivo extender la vida útil de las máquinas, aumentar la productividad y reducir los

costos de operación diarios. A diferencia del mantenimiento periódico, en el que los servicios se basan en intervalos programados, el CBM se basa en el estado de la máquina para determinar cuándo y qué tipo de mantenimiento se necesita. Al considerar el entorno operativo, las temperaturas y la aplicación, el CBM brinda un mejor control sobre el estado de la máquina.

Para saber cuándo es requerida una acción de mantenimiento, o dicho en otras palabras, cuál es la *condición*⁹ de la máquina, será necesario monitorizar el estado de salud de la máquina para seguir su *condición o estado* por medio de algún parámetro, por ejemplo la evolución de la vibración en función del tiempo. A esta acción es a la que llamamos Monitorizado de condición que es la herramienta fundamental del Mantenimiento Basado en Condición.

Siguiendo gráficamente la evolución de los parámetros medidos en función del tiempo, podremos detectar en cualquier momento cual es el estado de salud de la máquina que, contrastado con niveles de alarma preestablecidos nos permitirá saber cuándo es el momento de intervenir en la máquina para evitar el fallo de la misma.

Extrapolando del gráfico de evolución histórica podremos calcular la tendencia y predecir así cuanto tiempo falta hasta que se alcance el nivel de alarma.

En resumen: Mantenimiento predictivo (19) o Mantenimiento Basado en Condición (CBM) tienen el mismo significado y son en esencia la misma cosa. [20]

2.1.4. La medida de la Condición y sus parámetros

Según Jezdimir Knezevic [4], el procedimiento de medida de la *condición* reconoce que la razón principal para realizar el mantenimiento es el cambio en la *condición* y/o en las prestaciones, y que la ejecución de las tareas de mantenimiento preventivo debe estar basada en el *estado o condición* real del elemento o sistema. De esta forma, mediante la vigilancia de ciertos parámetros sería posible identificar el momento más conveniente en que se deben realizar las tareas de mantenimiento preventivo.

⁹ *Condición o estado*: Se refieren a la *condición o estado* de funcionamiento de una máquina. En esta tesis nos referiremos indistintamente a la *condición o estado* funcional de una MOV.

El objetivo de la vigilancia de la condición, sea cual sea su forma, es la observación de los parámetros que suministran información sobre los cambios en la *condición* y/o en las prestaciones del elemento o sistema.

Por lo tanto, la tarea de Mantenimiento Basado en la Condición, también llamado Mantenimiento Condicional, es un reconocimiento de que la principal razón para llevar a cabo el mantenimiento es el cambio en la *condición* y/o en las prestaciones, y de que la ejecución de las tareas de mantenimiento preventivo deben basarse en la *condición* real del elemento o sistema.

Para determinar los parámetros de vigilancia recurrimos al CBM, el cual utiliza dos indicadores de la *condición* según Jezdimir Knezevic [4]:

- Relevant Condition Predictor, RCP¹⁰.
- Relevant Condition Indicator, RCI¹¹.

RCP, es un parámetro observable que describe la *condición* del elemento en cada instante del tiempo operativo. Normalmente, este parámetro está relacionado directamente con la tendencia de las características que describen la *condición o estado* del elemento considerado. Por ejemplo el grado de desgaste de dibujo de un neumático. En el caso de una MOV la característica que describe su *condición* serían los valores obtenidos con sucesivas diagnosis, estáticas o dinámicas, en distintos instantes, es decir, la *tasa de supervivencia* con la que se puede establecer la tendencia de un indicador observable.

En este punto, hay que recordar que la diagnosis es el análisis de los valores de los parámetros físicos medidos, esfuerzo y par en el eje de la válvula, y tensión e intensidad del motor del actuador en un instante dado, los cuales se comparan con los valores de dichos

¹⁰ RCP Relevant Condition Predictor (Estimador adecuado de la Condición)

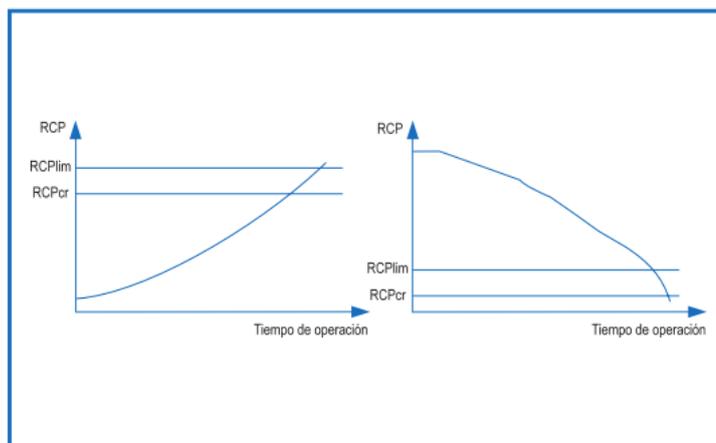
¹¹ RCI Relevant Condition Indicator (Indicador adecuado de la Condición)

parámetros en la condición de la MOV nueva o recién revisada. Con este análisis y comparación se determina el *margen de seguridad*¹² o *tasa de supervivencia* (29).

Por lo general, la *condición* del elemento o sistema es satisfactoria mientras que el RCP mantenga un valor que no alcance su nivel crítico, RCP_{cr} . En este punto, debe realizarse la tarea de mantenimiento preventivo, porque el fallo ocurrirá tan pronto como el indicador alcance su valor límite, RCP_{lim} .

Es decir, la *tasa de supervivencia* se puede garantizar hasta la siguiente parada programada siempre que no se supere el valor RCP_{cr} . Es necesario recalcar que el RCP no puede tener valores idénticos para dos o más instantes de tiempo, como ilustra la Figure 1. Esto significa que el RCP crece o decrece continuamente con el tiempo de operación por el efecto de envejecimiento de la MOV.

Figure 1 : Cambio del RCP durante el tiempo de operación



Fuente: Jezdimir Knezevic

Nota sobre la Figure 1: La curva descendente tiene un error tipográfico del libro [4], los valores RCP_{lim} y RCP_{cr} , están invertidos.

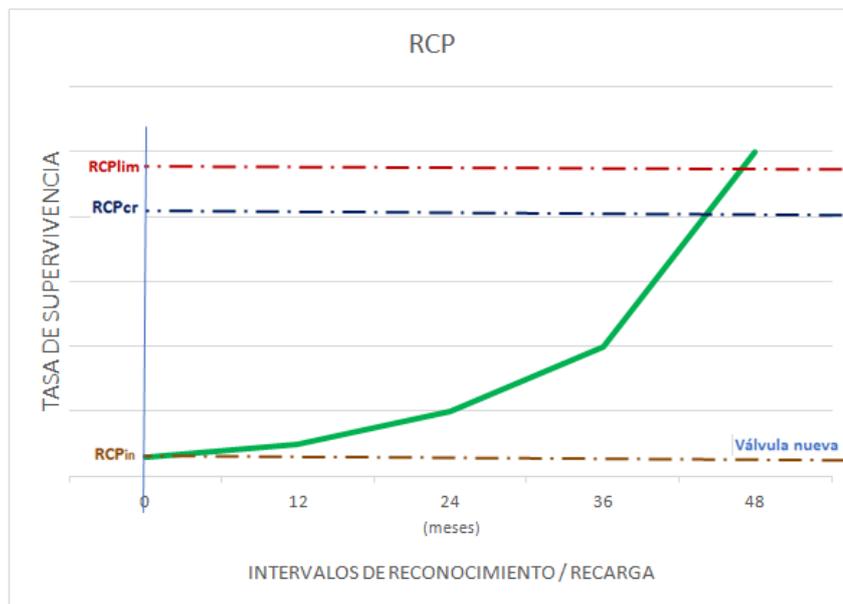
¹² *Margen de seguridad*: significa lo mismo que “*tasa de supervivencia*” tal y como se ha definido en el Glosario (29) y nos referiremos a una u otra definición indistintamente.

En el caso del RCP de una MOV podemos definir:

- Tiempo de operación, como el tiempo entre dos o más recargas de una planta de energía o el tiempo entre dos o más reconocimientos en un buque.
- RCP_{cr} , como el valor crítico de los parámetros de diagnosis con los que se puede asegurar el *margen de seguridad o tasa de supervivencia* de la MOV hasta la siguiente parada.
- RCP_{lim} , como el valor límite de los parámetros de diagnosis con los que no se puede asegurar el *margen de seguridad o tasa de supervivencia* de la MOV hasta la siguiente parada. Es decir, el fallo ocurrirá en cualquier momento.

En la Figure 2, se ha representado una curva en la que el eje de abscisas representa los períodos o intervalos de paradas programadas para la recarga de combustible en una central nuclear o de los reconocimientos en astillero del buque, y en el eje de ordenadas el valor de la *tasa de supervivencia* o tasa de vida hasta el fallo.

Figure 2 : Curva de tendencia de la Tasa de Supervivencia



Fuente: A. Varela

Nota sobre el valor Inicial RCP_{in} : Dicho valor indica que la MOV es nueva o recién revisada y en consecuencia en ese instante la *tasa de supervivencia* es la mayor posible. Tasa Supervivencia $RCP_{in} >$ Tasa Supervivencia RCP_{cr} , $>$ Tasa Supervivencia RCP_{lim} ,

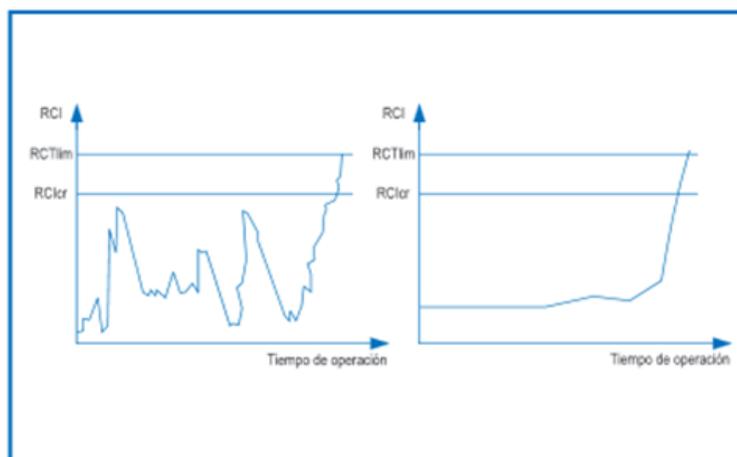
Los valores obtenidos sucesivamente se pueden extrapolar con la función de la pendiente para estimar el momento en que la misma cortará la ordenada de RCP_{cr} , y planificar la próxima revisión de mantenimiento preventivo o correctivo.

Por otra parte, el RCI es un indicador observable que muestra la condición del elemento o equipo en el instante de la comprobación. Ejemplos típicos de RCI son: Los niveles de presión, líquido de dirección asistida, vibración, ruido, la velocidad en «ralentí» del motor.

En una MOV podemos determinar que los parámetros observables serían los valores de intensidad y tensión del motor del actuador y/o de esfuerzo y par en el eje de la válvula que obtenemos con la diagnosis, los cuales determinan su RCI.

La *condición* del elemento o equipo será satisfactoria mientras el valor del RCI se mantenga sin alcanzar un nivel crítico, RCI_{cr} . Cuando se alcanza este nivel, debe realizarse la tarea de mantenimiento necesaria, porque el fallo ocurrirá tan pronto como el indicador alcance su valor límite, RCI_{lim} , Ver Figure 3.

Figure 3 : Cambio del RCI durante el tiempo de operación.



Fuente: Mantenimiento por Jezdimir Knezevic.

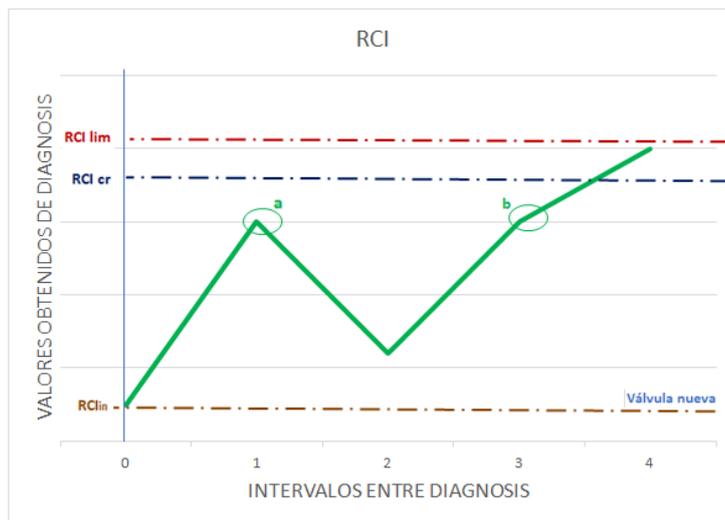
Es necesario recalcar que el RCI puede tener valores idénticos en diferentes instantes del tiempo operativo, aunque no necesariamente. En el caso de una MOV el RCI sería el diagnóstico (análisis de los valores de esfuerzo, par e intensidad y tensión) obtenido en un instante dado, ya sea en condiciones estáticas y/o dinámicas del circuito y por cualquiera de las técnicas disponibles.

En el caso del RCI de una MOV podemos definir:

- Tiempo de operación, como el tiempo entre dos diagnósticos consecutivos. Estas diagnósticos pueden o no coincidir con una parada programada (Reconocimiento o Recarga), en función de si se ha monitorizado en continuo la diagnóstico o si es posible realizarla durante el ciclo de operación.
- RCI_{cr} , como el valor crítico de los parámetros de diagnóstico con los que se puede asegurar el *margen de seguridad o tasa de supervivencia* de la MOV hasta la siguiente diagnóstico.
- RCI_{lim} , como el valor límite de los parámetros de diagnóstico con los que no se puede asegurar el *margen de seguridad o tasa de supervivencia* de la MOV hasta la siguiente diagnóstico.

En la Figure 4, se ha representado la curva de los valores de los parámetros o diagnóstico en un instante determinado.

Figure 4 : Valores de diagnóstico en un instante.



Fuente: A. Varela

Los puntos a y b pueden representar los valores de diagnóstico de máximo esfuerzo en condiciones estáticas o dinámicas del circuito. Aun así, puede garantizarse la *tasa de supervivencia* al estar por debajo del RCI_{cr} . Los valores de diagnóstico pueden o no coincidir en distintos instantes ya que dependen de muchos factores en el momento de la prueba, como las condiciones de caudal y presión de la línea y de otros efectos como el Pressure Locking (bloqueo por presión) y Thermal Binding (agarrotamiento térmico). Sin embargo, lo lógico es intentar realizar la diagnóstico con las mismas condiciones.

Nota sobre el valor RCI_{in} “Válvula nueva”: Dicho valor indica que la MOV es nueva o recién revisada y en consecuencia en ese instante la Tasa de supervivencia es la mayor posible siendo la mínima la Tasa en la ordenada de RCI_{cr} , Siendo Tasa Supervivencia $RCI_{in} >$ Tasa Supervivencia RCI_{cr} , $>$ Tasa Supervivencia RCI_{lim} ,

Los valores obtenidos en la diagnóstico para RCI_{in} “Válvula nueva” corresponden a la mayor *tasa de supervivencia*. El valor del indicador RCI puede en un instante dado y para las mismas condiciones operacionales del sistema dar resultados de diagnóstico distintos en función del envejecimiento de la MOV que no siempre es gradual. La primera diagnóstico realizada con la condición inicial de RCI_{in} será la diagnóstico de referencia que se utilizará para valorar los resultados de las diagnóstico posteriores.

En conclusión, una vez se adopta la decisión de establecer la tecnología de diagnóstico como estrategia CBM, se decidirá realizar el mantenimiento programado cuando los valores de RCI y/o RCP alcancen el nivel crítico.

2.1.5. Mantenimiento centrado en la Fiabilidad

RCM¹³ o Mantenimiento Centrado en Fiabilidad es una técnica más [2], aunque otros autores como Campbell [21] la definen como una metodología dentro de las posibles para elaborar un plan de mantenimiento, en una instalación industrial y presenta algunas ventajas importantes sobre otras técnicas. Inicialmente fue desarrollada para el sector de la aviación, donde no se obtenían los resultados más adecuados para la seguridad de la navegación aérea.

¹³ RCM: Reliability Centred Maintenance.

Posteriormente fue trasladada al campo militar y mucho después a otras industrias, tras comprobarse los excelentes resultados que había dado en el campo aeronáutico [6].

La fiabilidad y disponibilidad de una instalación dependen sin duda alguna del mantenimiento que se realice en ella.

Es muy habitual dar importancia al mantenimiento de los equipos principales y no preocuparse en la misma medida de todos los equipos auxiliares lo cual es un grave error pues una simple válvula o un simple transmisor pueden parar una planta u ocasionar un fallo crítico [22]. Un buen plan de mantenimiento es aquel que ha analizado todos los fallos posibles, y que ha sido diseñado para evitarlos [20].

Las tareas fundamentales del RCM son [6]:

- a) Identificación del elemento a analizar.
- b) Determinación de las funciones del elemento.
- c) Determinación de lo que constituirá un fallo de esas funciones.
- d) Identificación de las causas de esos fallos funcionales.
- e) Identificación de los efectos de esos fallos.
- f) Utilización de la lógica RCM para seleccionar la estrategia adecuada.
- g) Documentación del programa de mantenimiento y depuración del mismo conforme se adquiere experiencia en la operación del elemento.

2.1.6. Diagnóstico de Válvulas Motorizadas

La diagnosis de válvulas es una tecnología o conjunto de conocimientos científicos del campo de la ingeniería de sistemas y del mantenimiento predictivo que utiliza una metodología de verificación con técnicas específicas de medida de parámetros físicos para comprobar el *estado o condición* de las válvulas actuadas. [23], [24] Para hacer una correcta diagnosis es necesario utilizar:

- a) Los criterios base de diseño,
- b) Las condiciones de operación del sistema donde se encuentren instaladas las válvulas,
- c) Los ciclos previstos de actuación,
- d) Las condiciones ambientales y de mantenibilidad,
- e) Otros parámetros funcionales.

Por otra parte, se deben considerar los requisitos de pruebas establecidos en las normas aplicables en cada caso para la planta o sistema, ya que en una misma planta podemos encontrar sistemas de seguridad, sistemas críticos o no críticos para la disponibilidad de la planta así como sistemas convencionales o auxiliares con diferentes requisitos.

Tanto en sistemas de seguridad y críticos como en sistemas convencionales podemos encontrar válvulas actuadas del mismo tipo y fabricante pero con requisitos diferentes respecto a:

- a) El tiempo de actuación, apertura y cierre.
- b) Los requisitos de estanqueidad aguas arriba y aguas abajo.
- c) Los requisitos de estanqueidad de la propia válvula.
- d) Los requisitos de condiciones ambientales y sísmicas y/o resistencia a las vibraciones y el consecuente mantenimiento de su integridad estructural y operativa.
- e) Otros requisitos.

Con todo ello, se establecerá una metodología de verificación del *estado* de la válvula y su actuador, distinta y adecuada a sus condiciones de operación y a los requisitos que deban cumplir en cada caso, definiendo los criterios de aceptación de la prueba funcional para diagnosticar su *estado* respecto al tiempo de funcionamiento desde su última revisión general o parcial, su grado de degradación y envejecimiento.

Evidentemente, el método de diagnosis para una MOV variará en función del tipo de válvula (Compuerta, Globo, Mariposa) y del tipo de actuador (Limitorque, Rotork, u otros).

Para poder diagnosticar las condiciones funcionales de la válvula actuada se utilizan distintas técnicas de medida y verificación, así como de adquisición y tratamiento de datos. Se pueden utilizar distintas técnicas para la medida de parámetros necesarios para la diagnosis como la temperatura, la presión, el caudal, el esfuerzo y el par transmitidos sobre el eje, medidas eléctricas del motor obtenidas en local o desde el CCM¹⁴, etc.

Los equipos de adquisición de datos y los de análisis pueden ser distintos en función del fabricante o empresa de ingeniería especializada o empresa de servicios. Dichos datos se

¹⁴ CCM: Centro de Control de Motores

evalúan con un software desarrollado para tal efecto y se almacenan en una base de datos para cada válvula y su actuador, de forma que los parámetros obtenidos puedan compararse con un primer diagnóstico (6) de referencia (válvula y actuador nuevos o completamente revisados). Además, los ingenieros especialistas en esta tecnología deberán poseer una cualificación específica para poder realizar las evaluaciones.

Finalmente, conviene mencionar que el objetivo último de la diagnosis de válvulas es evaluar la *condición* en un momento determinado para verificar que la capacidad del actuador supera el máximo esfuerzo de actuación requerido por la válvula, estableciendo el *margen de seguridad o tasa de supervivencia*, que garantice la disponibilidad de la misma hasta la siguiente revisión por mantenimiento programado y/o la parada de la planta o del sistema, así mismo programada.

La diagnosis de válvulas es, por lo tanto, una tecnología útil para garantizar la fiabilidad perseguida por el RCM y necesaria para la valoración de la *condición* preconizada por el CBM. En resumen y para colocar en su justo término la diagnosis de válvulas, podemos definir como:

- a) **Metodología** (22): R.C.M. Reliability Centred Maintenance o Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad. [6]
- b) **Estrategia** (9): C.B.M. Condition Based Maintenance o Mantenimiento Basado en la Condición. [17]
- c) **Tecnología** (31): Valve diagnostic test. La tecnología de diagnosis utilizada como CBM. [2]

En la Figure 5, se representa la interdependencia entre la metodología RCM para definir el tipo de mantenimiento que requiere un ESC¹⁵ en función de su grado de criticidad, la estrategia de mantenimiento CBM adecuada para anticiparse al fallo en función de su *estado o condición* y la tecnología de diagnosis que permitirá garantizar la fiabilidad de una MOV.

¹⁵ ESC: Estructura, Sistema, Componente (SSC: Structure, System, Component)

Figure 5 : Relación RCM-CBM-Tecnología diagnosis

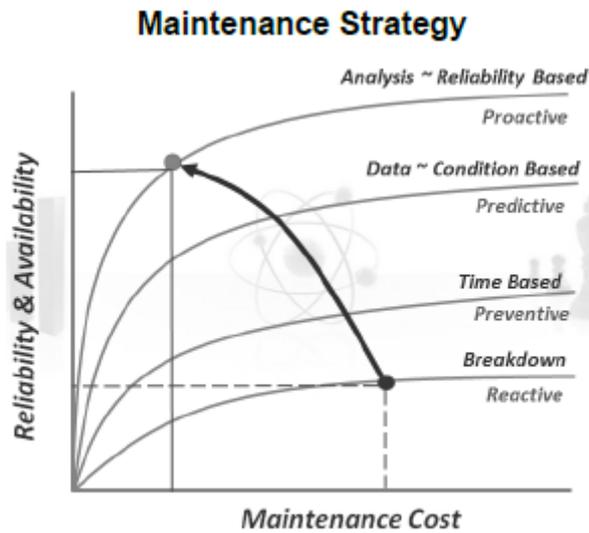


Fuente: A. Varela

Por otra parte, la ABS¹⁶ en el apéndice 2 (Reliability Tools and Techniques), del apartado 7 de la Guía para el estudio basado en la fiabilidad de las máquinas [25], se presenta, más abajo, el gráfico de la Figure 6 que compara el grado de Fiabilidad / Disponibilidad respecto al coste de mantenimiento que representa para los ESC definidos como críticos o aquellos que requieren una monitorización de su *condición o estado*.

¹⁶ ABS: American Bureau of Shipping

Figure 6 : Estrategias de Mantenimiento / Fiabilidad y Disponibilidad



Fuente: ABS Guide for Survey Based on Machinery Reliability

Se puede concluir que en función del análisis de fiabilidad realizado por la metodología RCM del sistema y la estrategia adoptada de mantenimiento, será menor el coste de mantenimiento del ESC. También supondrá una reducción de indisponibilidades para la planta o buque.

2.2. Antecedentes (Background) sobre la diagnosis de las MOV

En este apartado se analiza, a partir del accidente TMI-2, la evolución de la investigación realizada por la NRC y el EPRI, así como los problemas específicamente detectados sobre las MOV y las soluciones indicadas en el programa propuesto por EPRI.

2.2.1. Evolución histórica de la diagnosis de válvulas en centrales nucleares

A principios de los años 80, tanto la Nuclear Regulatory Commission (NRC) como la industria nuclear detectaron que las MOV tenían problemas conceptuales que requerían soluciones genéricas, como se menciona en el EPRI¹⁷ MOV PPP¹⁸. [24] [26]

El plan de acción fue desarrollado para proporcionar un plan exhaustivo e integrado para las acciones que en ese momento se consideraron necesarias por la NRC para corregir y mejorar la regulación y operación de las centrales nucleares, basándose en el retorno de experiencia del accidente de TMI-2 y los estudios oficiales de la investigación del accidente. [27]

En los años 90, EPRI (Electric Power Research Institute) condujo un programa de investigación para desarrollar métodos avanzados para evaluar las características de las válvulas actuadas del tipo de compuerta, globo y de mariposa, utilizadas en centrales nucleares. El programa se llamó EPRI Motor-Operated Valve (MOV) Performance Prediction Program. [23]

Dicho programa proporcionó una metodología validada para predecir las características de las válvulas actuadas del tipo de compuerta, globo y de mariposa, utilizadas en centrales nucleares.

Este programa, por otra parte, satisfizo el deseo de las empresas de electricidad, propietarias de las centrales nucleares, de tener un método para mejorar la demostración de la capacidad de las MOV respecto a su capacidad de actuación según las condiciones base de diseño. [6]

¹⁷ EPRI: Electric Power Research Institute

¹⁸ PPP: Performance Prediction Program.

Aunque el programa de EPRI se enfocó para predecir las características de las MOV existentes en las plantas en explotación, también proporcionó muchas ideas y avances sobre el diseño y la fabricación de las MOV.

2.2.2. Problemas detectados en las válvulas actuadas

Como consecuencia del análisis detallado del accidente de TMI, la Industria identificó que las MOV tuvieron algunos problemas como [27]:

- a) Inadecuado dimensionamiento de las Motor Operated Valves
- b) Mayores esfuerzos funcionales requeridos que los esperados.
- c) Daños en las válvulas durante la operación.
- d) Identificación de otros mecanismos degradados que reducían los márgenes de funcionamiento.
- e) Problemas hidrodinámicos en las válvulas de mariposa con pérdida de su fiabilidad respecto al par esperado.

2.2.3. Propuesta a los problemas detectados

El EPRI MOV PPP, procura métodos de validación, que se han mostrado apropiados para ambos requisitos de empuje y par, para las válvulas de compuerta, globo y mariposa, así como varios enfoques alternativos para acomodar o ajustar el efecto del “rate-of-loading”¹⁹ al empuje del actuador.

La investigación realizada por el programa condujo, por una parte, a dar un paso de gigante hacia una mejora de la comprensión sobre las MOV y por otra, a disponer de un sistema de predicción de sus características funcionales.

El sistema o tecnología para diagnosticar las válvulas había sido desarrollado para determinar la *condición* de la válvula y el actuador monitorizando las señales representativas de esfuerzo y par en el eje, el desplazamiento del paquete de arandelas del actuador, la corriente del motor, el control de los interruptores de par y la presión diferencial y el caudal.

¹⁹ Rate-of-loading: Tasa de carga

Esta información se utilizó para determinar tanto la operatividad como para identificar los problemas puntuales de la válvula y el actuador que pudieran requerir mantenimiento o reparación.

2.2.4. Objetivo del Performance Prediction Program (PPP)

La idea básica es verificar que la capacidad del actuador excede el requerimiento máximo de la válvula con un *margen de seguridad o tasa de supervivencia* que asegure el funcionamiento hasta la siguiente parada programada de la planta. [26]

El método consiste en:

- a) Aplicar los sensores y otros equipos de medida para medir los parámetros clave de las MOV.
- b) Diagnosticar las MOV bajo los criterios base de diseño en condiciones estáticas y dinámicas.
- c) Establecer y controlar la tendencia de sus características de funcionamiento e identificar los problemas.

El programa de las pruebas de diagnosis incluye las siguientes fases:

- a) Un plan de pruebas de diagnosis estáticas en las MOV relacionadas con la seguridad con una frecuencia basada en el riesgo y su *tasa de supervivencia*. [28]
- b) Un programa para evaluar la potencial degradación de la válvula con pruebas de diagnosis dinámicas. [29]
- c) Evaluación de los fallos de las MOV con las acciones correctivas necesarias, y un control de tendencia sobre sus características y problemas. [30]

Toda la metodología y actividades desarrolladas, así como las pruebas que se utilicen como metodología de validación, se realizaron de acuerdo con U.S. Federal Government, Code of Federal Regulations, 10 CFR²⁰ 50, Appendix B, Quality Assurance Requirements. [31]

²⁰ CFR: Code of Federal Regulations

Una vez fijados los objetivos del PPP, el EPRI siguiendo las recomendaciones de la NRC, solicitó la colaboración de las ingenierías especializadas y los fabricantes de válvulas y actuadores para desarrollar la tecnología de Diagnóstico de las MOV y más tarde de las AOV²¹. [32]

2.3. Estado actual de la diagnosis de válvulas

Se exponen en este apartado la evolución del mantenimiento en las centrales nucleares así como la situación del mantenimiento en el sector naval para poder establecer de esta forma la diferente evolución de estrategias entre ambos sectores.

Sin embargo, no se entra en la exposición de los distintos tipos de mantenimiento y su evolución, baste con decir que hasta la revolución industrial sólo se hacía mantenimiento correctivo y a partir de los años 60 el impulso de la industria aeronáutica, espacial y nuclear dieron un valor añadido a la Ingeniería de mantenimiento con una base científica y aparecieron las técnicas de mantenimiento preventivo y predictivo.

2.3.1. Situación actual del mantenimiento de válvulas motorizadas en centrales nucleares de generación eléctrica

En las centrales nucleares desde los últimos 50 años las estrategias de mantenimiento, como en la mayoría de las industrias, han ido evolucionando en función de los avances tecnológicos disponibles y cumpliendo las normas y guías reguladoras del sector.

Por otro lado, los organismos reguladores de este sector han recomendado, cuando no impuesto, nuevas estrategias y técnicas de mantenimiento que redundaran en la seguridad de la planta.

En muchos casos, el regulador y el propietario de la planta han recurrido al análisis de fallos para revisar los criterios de diseño de los sistemas e implementar mejoras de acuerdo al histórico de fallos de los equipos.

²¹ AOV: Air Operate Valve

Un factor fundamental en la mejora del diseño, la operación y el mantenimiento de las centrales han sido los incidentes e incluso accidentes con efectos de mayor o menor gravedad para las mismas, el medio ambiente y las personas. Como consecuencia de ello, se han dedicado grandes esfuerzos en ingeniería de mantenimiento y en el diseño conceptual para garantizar la disponibilidad en aras de la mayor productividad de las plantas, garantizando en primer lugar su seguridad.

2.3.1.1. La evolución del diseño conceptual de los sistemas y de la Ingeniería de mantenimiento en las centrales nucleares

Es importante establecer que con las diferentes estrategias de mantenimiento se persigue mejorar la disponibilidad (7), la fiabilidad (11), la mantenibilidad (13) y la seguridad de la planta.

Para mejorar la disponibilidad en las centrales de generación eléctrica se recurre a la mejora del diseño conceptual y a la duplicación de sistemas y/o de equipos, pudiendo de esta forma solventar los fallos inevitables y los tiempos de mantenimiento sin pérdida de disponibilidad.

En el caso de la fiabilidad, se recurre a los criterios de diseño más conservadores, a la calidad de los componentes, al análisis de fallos y en definitiva a la aplicación del RCM. Cabe destacar que la fiabilidad última de la planta o del sistema viene limitada por la fiabilidad del equipo y sus componentes.

La mantenibilidad, por otra parte, influye directamente en la fiabilidad dado que un buen mantenimiento debe reducir eficazmente los fallos del sistema.

Por todo ello, la ingeniería de mantenimiento en las centrales ha evolucionado hacia la búsqueda de la excelencia a través de la metodología RCM y la estrategia CBM tanto en sistemas y equipos como en válvulas actuadas.

2.3.1.2. El Mantenimiento Basado en la Condición o CBM en las válvulas motorizadas de las centrales nucleares

En la mayoría de las industrias, las válvulas, al igual que los demás equipos y componentes de un sistema, han pasado por la evolución de las estrategias de mantenimiento y las nuevas técnicas de mantenimiento preventivo, pero en lo que respecta al mantenimiento predictivo o mantenimiento basado en la condición (CBM) se han quedado al margen de esta estrategia o técnica de mantenimiento, al contrario que en los equipos principales del sistema.

Sin embargo, en el sector de generación nuclear, los organismos reguladores han impulsado nuevas técnicas de CBM para las válvulas actuadas, como veremos en el punto siguiente.

2.3.1.3. Evolución del mantenimiento de válvulas en las centrales nucleares

En las situaciones incidentales o accidentales en cualquier sector industrial es el momento en el que más se potencia el análisis de fallos y sus consecuencias.

Los organismos reguladores, como la NRC²², el CSN²³ en las centrales nucleares o la OMI²⁴ en la industria naval, entre otros, intervienen más en estos casos para garantizar la seguridad de las plantas y los buques. Tal como se ha dicho anteriormente, la seguridad está ligada a la fiabilidad de sus sistemas y equipos.

Cuando la seguridad es el factor preponderante en la explotación de una planta, la fiabilidad de los sistemas y equipos toma el liderazgo en la gestión del mantenimiento por encima de la disponibilidad para la producción, aunque ambos conceptos están íntimamente ligados. Es decir, la fiabilidad se integra como estrategia corporativa en la Ingeniería del mantenimiento.

²² NRC: Nuclear Regulatory Commission.

²³ CSN: Consejo Seguridad Nuclear

²⁴ OMI: Organización Marítima Internacional

Con la fiabilidad de un sistema, intentamos que el tiempo entre dos fallos sea superior al tiempo entre dos paradas programadas, ya sea en una planta de generación de energía, en una aeronave o en un buque. Pretendemos, por lo tanto, conseguir la máxima fiabilidad durante el ciclo de vida del sistema o equipo.

Por otro lado y como consecuencia del análisis del accidente de TMI²⁵ se descubrieron algunos fallos operativos de las válvulas con funciones importantes en los sistemas de seguridad de la planta.

Con el estudio de los fallos se han podido constatar distintos efectos sobre la fiabilidad como por ejemplo que la fiabilidad de los equipos y componentes, exigida a los fabricantes, debía comprobarse en condiciones estáticas y dinámicas reales de funcionamiento del sistema ya que ello afectaba a la fiabilidad del ciclo de vida del mismo [30]. Además, también se constató que el mantenimiento programado puede ser el causante de fallos operativos si no se verifica su funcionamiento post-intervención.

Es cierto que después de la parada de un sistema o equipo se realizan, como buena práctica, las pruebas funcionales previas a la puesta en marcha. Con ello validamos las condiciones operativas en ese momento. La cuestión es si el sistema será fiable hasta la siguiente parada programada con las estrategias de mantenimiento seguidas hasta el momento.

2.3.1.4. La solución a las incertidumbres del mantenimiento preventivo clásico

Para responder a la incertidumbre mencionada en el apartado anterior, se estableció un programa de mantenimiento basado en la condición ver 2.1.4, determinando como “indicador observable” los valores funcionales actuador-válvula y los parámetros del sistema en el que está instalada, utilizando como herramienta los sistemas de diagnóstico de válvulas motorizadas y neumáticas.

²⁵ TMI: Three Mile Island

Esta metodología consiste en realizar una diagnosis as-found²⁶ y una as-left²⁷, después de cada intervención de mantenimiento preventivo con desmontaje o intrusivo, y después de un mantenimiento correctivo. Los datos de diagnosis obtenidos se introducen en la base de datos para el estudio de tendencia, asegurando que no se han alcanzado los valores críticos y así poder asegurar la tasa de supervivencia entre paradas o reconocimientos.

2.3.1.5. La mejora del mantenimiento con los sistemas de control continuo de la condición de los equipos y las válvulas actuadas

Actualmente en las centrales de nuevo diseño y para el mantenimiento de sistemas complejos, la tendencia actual es ir a sistemas de control continuo de la condición que sean expertos, ya que, mediante la utilización de los sistemas digitales de tratamiento de datos y la inteligencia artificial se pueden:

- a) Procesar una gran cantidad de información rápidamente reduciendo el tiempo de diagnosis y de determinación de las posibles acciones de mantenimiento preventivo a realizar.
- b) Analizar la situación con objetividad sin olvidar ningún hecho relevante, reduciendo la probabilidad de realizar un diagnóstico erróneo.
- c) Detectar fallos incipientes mediante la vigilancia en directo de los parámetros de Condición del sistema.
- d) Detectar fallos humanos.
- e) Analizar (2) las consecuencias de un fallo producido y determinar las acciones a realizar para mitigar dichas consecuencias.

Otro asunto será la valoración de los costes asociados a una u otra estrategia de mantenimiento, sus beneficios y la posibilidad de implantar un sistema de diagnosis en una planta en funcionamiento o de nuevo diseño y construcción.

²⁶ As-found: Como se encontró

²⁷ As-left: Como se dejó

2.3.2. Situación actual del mantenimiento de válvulas motorizadas en los buques

Es fundamental exponer en este apartado, como primer eslabón del Estado del Arte en la industria naval, la normativa y requisitos del regulador OMI²⁸ a través del Convenio Solas y el papel de las Sociedades de clasificación para determinar las responsabilidades del armador sobre el mantenimiento del buque, sus sistemas, equipos y componentes. También se tienen en consideración las recomendaciones de la ABS²⁹ sobre las estrategias de mantenimiento y las nuevas tecnologías.

En este apartado se clarifica la responsabilidad del armador y su decisión sobre las estrategias de mantenimiento adoptadas para los sistemas y equipos del buque de forma general. Además, se ha constatado que no existen requisitos específicos sobre las válvulas motorizadas en dicha normativa ya que se consideran equipos necesarios e incluidos en los sistemas del buque.

Se exponen, por lo tanto, los requisitos sobre los reconocimientos, inspecciones y responsabilidades de las actividades de mantenimiento definidas por el Convenio Solas en primer lugar, así como las responsabilidades sobre el mantenimiento de las Sociedades de Clasificación y del Armador en último lugar.

2.3.2.1. Convenio “SOLAS³⁰”. Prescripciones

El Capítulo I del convenio contiene las disposiciones generales además de las partes:

- Parte A, sobre ámbito de aplicación, definiciones, etc. [33]
- Parte B, sobre Reconocimientos y certificados
- Partes C, Siniestros

A continuación se exponen de forma abreviada en este apartado las reglas de la Parte B que determinan el alcance de los reconocimientos de obligado cumplimiento.

²⁸ OMI: Organización Marítima Internacional

²⁹ ABS: American Bureau of Shipping

³⁰ SOLAS: Safety of Life at Sea

Es importante resaltar que según Solas el mantenimiento del buque se garantiza a través de los Reconocimientos mencionados a continuación.

Si bien en las siguientes reglas que se enumeran se detallan los reconocimientos exigidos en los buques, no se pretende hacer una exposición de las mismas ya que en la tabla 1 , que se encuentra al final de este apartado, se recogen todos ellos abreviadamente.

Regla 6: Inspección y reconocimiento

Esta regla hace mención a los inspectores y organismos autorizados por las Administraciones para la realización de las Inspecciones y Reconocimientos.

En todo caso, la Administración garantizará incondicionalmente la integridad y eficacia de la inspección o del reconocimiento y se comprometerá a hacer que se tomen las disposiciones necesarias para dar cumplimiento a esta obligación.

Regla 7: Reconocimientos en buques de pasaje

En esta regla se detalla minuciosamente el alcance de los reconocimientos ya sea el Inicial, el de Renovación y los Adicionales. Ver Tabla 1 : Tipos de reconocimiento.

Regla 8: Reconocimiento de los dispositivos de salvamento y otro equipo de los buques de carga.

Esta regla menciona específicamente los Reconocimientos de los dispositivos de salvamento y otro equipo de seguridad de los buques de carga de arqueo bruto igual o superior a 500.

Regla 9: Reconocimientos de las instalaciones radioeléctricas de los buques de carga

Esta regla hace mención únicamente a los Reconocimientos de las instalaciones radioeléctricas y a que dichos reconocimientos se consignaran en el Certificado de seguridad radioeléctrica para los buques de carga.

Regla 10: Reconocimiento del casco, las máquinas y el equipo de los buques de carga

Esta regla define los Reconocimientos, sus períodos y su alcance para buque de carga. Ver Tabla 1.

Regla 11: Mantenimiento de las condiciones comprobadas en el reconocimiento

Además de enunciar las reglas que determinan los distintos reconocimientos que aparecen resumidos en la Tabla 1 se detallan a continuación los párrafos fundamentales de la Regla 11, dado que en dichos párrafos se establece la responsabilidad directa sobre el mantenimiento del buque, según el Convenio Solas.

Esta regla menciona literalmente:

- a) *“El estado del buque y de su equipo será mantenido de modo que se ajuste a lo dispuesto en las presentes reglas, a fin de garantizar que el buque seguirá estando, en todos los sentidos, en condiciones de hacerse a la mar sin peligro para él mismo ni para las personas que pueda haber a bordo.”*
- b) *“Realizado cualquiera de los reconocimientos del buque en virtud de lo dispuesto en las reglas 7, 8, 9 ó 10, no se efectuara ningún cambio en la disposición estructural, las máquinas, el equipo y los demás componentes que fueron objeto del reconocimiento, sin previa autorización de la Administración.”*
- c) *“Siempre que el buque sufra un accidente o que se le descubra algún defecto y éste o aquél afecten a su seguridad o a la eficacia o la integridad de sus dispositivos de salvamento u otro equipo, el capitán o el propietario del buque informarán lo antes posible a la Administración, al inspector nombrado o a la organización reconocida encargados de expedir el certificado pertinente, quienes harán que se inicien las investigaciones encaminadas a determinar si es necesario realizar el reconocimiento prescrito en las reglas 7, 8, 9 o 10. Cuando el buque se encuentre en un puerto regido por otro Gobierno Contratante, el capitán o el propietario informarán también inmediatamente a la autoridad del Estado rector del puerto interesada, y el inspector nombrado o la organización reconocida comprobarán si se ha rendido ese informe.”*

Como se puede observar en los párrafos a, b y c de la regla 11, en ellos se determina que el buque y sus sistemas y equipos, y por consiguiente las válvulas, será mantenido sin más precisión que la obligación de pasar los reconocimientos enunciados en la Tabla 1 en cuanto a los períodos, alcances y sus respectivos niveles. Por otro lado, se menciona la obligación de

solicitar la autorización de la Administración tanto en caso de accidente como en el caso de realizar cualquier modificación o cambio que afecte a sus equipos y componentes. Se debe entender que las válvulas son componentes de los sistemas y equipos del buque dejando bajo la responsabilidad del armador y del Capitán el alcance de su plan de mantenimiento para garantizar la seguridad del buque y las personas, así como la integridad de sus sistemas y equipos.

Tabla 1 : Tipos de reconocimiento.

TIPO DE RECONOCIMIENTO	PERÍODO	ALCANCE	NIVEL
Reconocimiento inicial	Antes de que el buque entre en servicio	Estructura, equipo, accesorios, medios y materiales	Completo
Reconocimiento renovación	No más de cinco años.	Estructura ,equipo, accesorios, medios y materiales	Completo
Reconocimiento intermedio	En la segunda o tercera fecha de Revisión ,anual (+/- 3meses)	Equipos de seguridad y sistemas de bombas y tuberías.	Asegurar buen estado
Reconocimiento anual	Un año. (+/- 3meses)	Estructura, equipo, accesorios, medios y materiales	Examen general
Reconocimiento adicional	Sólo después de investigación o después modificaciones o reparaciones requeridas.	Renovaciones o reparaciones efectuadas, materiales empleados e idoneidad del buque para operar si peligro.	General o parcial

Fuente 1 : Tabla de la distribución temporal de los reconocimientos a los que debe someterse el buque, obtenida de “Seguridad Gaseros”, del Dr. Jaime Rodrigo de Larrucea [34] [35] [36]

2.3.2.2. Sociedades de clasificación. Objetivos

A continuación se establece la relación entre el Convenio Solas y los estatutos del IACS con incorporación literal de los siguientes párrafos:

- a) En el Convenio Solas, según el Capítulo II-1, Construcción-estructura, estabilidad, instalaciones, en la Parte A1 Estructura de los buques.

Se mencionan específicamente las prescripciones de mantenimiento en la Regla 3-1 Prescripciones sobre aspectos estructurales, mecánicos y eléctricos aplicables a los buques

“Además de las prescripciones que figuran en otras partes de las presentes reglas, los buques se proyectarán, construirán y mantendrán cumpliendo las prescripciones sobre aspectos estructurales, mecánicos y eléctricos de una sociedad de clasificación que haya sido reconocida por la Administración de conformidad con las disposiciones de la regla XI/1, o las normas nacionales aplicables de la Administración que ofrezcan un grado de seguridad equivalente.”

- b) En los Estatutos de IACS³¹ se establecen sus objetivos en su Preámbulo punto 1.2:

“The objective of ship classification is to verify the structural strength and integrity of essential parts of the ship’s hull and its appendages, and the reliability and function of the propulsion and steering systems, power generation and those other features and auxiliary systems which have been built into the ship in order to maintain essential services on board for the purpose of safe operation of a ship. Classification Societies aim to achieve this objective through the development and application of their own rules and by verifying compliance with international and/or national statutory regulations on behalf of flag Administrations. However, Classification Societies are not guarantors of safety of life or property at sea or the seaworthiness of a vessel because the Classification Society has no control over how a vessel is operated and maintained in between the periodical surveys which it conducts.”

³¹ IACS: International Association of Classification Societies

Se puede concluir en éste apartado que:

Las sociedades de clasificación no son garantes de la seguridad de la vida o propiedad en el mar o la navegabilidad de un buque porque la sociedad de clasificación no tiene control sobre cómo un buque es operado y mantenido entre las inspecciones periódicas que se lleven a cabo.

Por lo tanto, se establecen de forma genérica las prescripciones sobre el mantenimiento de los buques según el Convenio Solas y el alcance de la verificación de las Sociedades de Clasificación, las cuales especifican que no son garantes de cómo un buque es operado y mantenido.

2.3.2.3. Recomendaciones de American Bureau of Shipping

ABS en el Prólogo de su Guía sobre técnicas de mantenimiento [25] indica que para cumplir con su principal misión de garantizar la seguridad de la vida y la propiedad debe promover el desarrollo y la verificación de las normas de diseño, construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones. Estas normas se basan en los principios de la ingeniería y arquitectura naval que han demostrado su eficiencia satisfactoriamente a través de la experiencia en el servicio y un análisis sistemático.

Por otra parte, uno de los objetivos de dicha Guía es proporcionar la mayor fiabilidad de los ESC y la seguridad de los buques, basándose en la mejora de las características de los programas de mantenimiento para la reducción de los fallos de los ESC. Recomienda, en consecuencia, la utilización de las estrategias y tecnologías que hayan demostrado ser efectivas en los planes de mantenimiento.

Dentro de esta política, recomienda la utilización del mantenimiento predictivo (CBM) y el aumento de las pruebas en servicio para satisfacer los requisitos relativos a la seguridad. Constata, por otro lado, que los armadores van implementando gradualmente dicha estrategia.

Sin embargo, en la última revisión de la Guía de 2016 no aparece la tecnología de diagnóstico de válvulas motorizadas aunque se recomiendan las comprobaciones preventivas habituales en motores eléctricos para las MOV, como comprobación del aislamiento etc., y en todo caso aparece, en la Tabla 8 del apéndice 6 de la Guía de ABS mencionada, una recomendación sobre el control de la curva de potencia del motor como indicador de la variación del par.

2.3.2.4. Responsabilidades del armador en la estrategia de mantenimiento

Como conclusión fundamental de este apartado se debe establecer que el responsable último del mantenimiento y la operación del buque es el armador y en su caso el Capitán del buque. Este deberá respetar los reconocimientos exigidos, las inspecciones periódicas y reglamentarias, y será siempre responsable de establecer la estrategia y el plan de mantenimiento. Para ello, además de cumplir con todas las exigencias, podrá seguir las recomendaciones del Regulador (OMI y ABS) y apoyarse en las recomendaciones del astillero, de los suministradores y fabricantes para definir, finalmente, los programas de mantenimiento a bordo y en varadero.

2.4. Descripción, mantenimiento y comprobaciones de una MOV

Parece evidente que las recomendaciones de mantenimiento y comprobaciones de los fabricantes de los actuadores y de las válvulas forman parte de la experiencia de la industria y por tanto son el primer eslabón del estado del arte de las MOV.

En este apartado, ver anexo A.1. Descripción y Comprobaciones en una MOV, se describe a título de ejemplo una válvula de compuerta con su actuador Limitorque tipo SMB. De cualquier manera, no se pretenden describir todos los tipos de válvulas y actuadores que se pueden encontrar en una planta. Sin embargo, esta anexo es necesario para identificar las partes que forman el actuador y la válvula y comprender las técnicas utilizadas en diagnóstico de las MOV.

Estas comprobaciones forman parte de la metodología de trabajo de mantenimiento para una posterior realización de una diagnosis estática como resultado As-left. A partir de esta revisión se realiza el control de tendencia de los parámetros fundamentales de funcionamiento y para ello se realizan periódicamente las pruebas de diagnosis As-found. El control de la tendencia puede realizarse, cuando se considere, con una monitorización continua de dichos parámetros fijando las alarmas del nivel crítico y el nivel límite.

2.5. Métodos, técnicas, equipos e informes de diagnosis para una MOV

En éste apartado se exponen los distintos métodos de diagnosis, la información adquirida por los equipos de diagnosis y específicamente la diagnosis desde el CCM. Todas ellas son tecnologías desarrolladas por el EPRI y las empresas de ingeniería especializadas del sector nuclear desde el accidente de TMI.

Los distintos métodos de diagnosis utilizan un conjunto de técnicas específicas para la medida de los parámetros mecánicos y eléctricos que son necesarios para el diagnóstico representativo del *estado o condición* de la MOV.

Se pueden diferenciar dos clases de parámetros atendiendo a su naturaleza:

- 1) Parámetros mecánicos de esfuerzo, empuje y par
- 2) Parámetros eléctricos, intensidad, tensión, potencia y resistencia.

Estos parámetros se pueden obtener con distintas técnicas de medida:

- a) Técnicas de medida directa de parámetros mecánicos o eléctricos
- b) Técnicas de medida indirecta de parámetros mecánicos.

2.5.1. Métodos de diagnosis con medidas de parámetros mecánicos

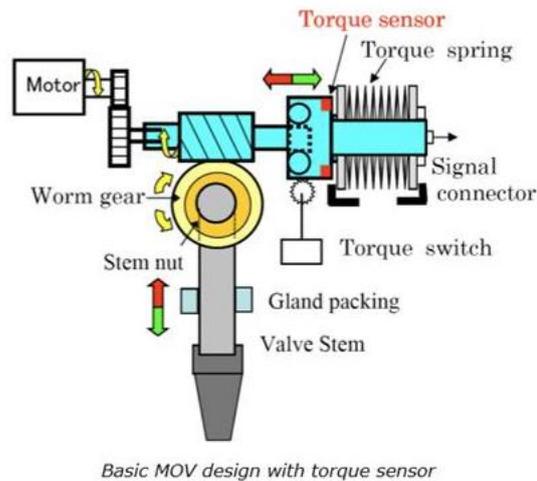
Los métodos de diagnosis se clasifican en función de su precisión y de las técnicas de medida utilizadas ver Tabla 2 del apartado 2.5.4 que aparece más abajo.

Los métodos de diagnosis con medida de parámetros mecánicos se dividen entre las técnicas de medida en el actuador y las de medida en la válvula, ya sea en el vástago o en el puente de la misma.

2.5.1.1. Método de diagnosis basado en la medida mecánica indirecta en el actuador

El primer método está basado en la medida de empujes que correlaciona el desplazamiento del muelle limitador de par del actuador (spring pack o Torque spring) con el empuje en el vástago, medido en una célula de carga colocada sobre el actuador y contra el que impacta el vástago en la maniobra de apertura, lo que se denomina ensayo de calibración. Posteriormente, en maniobras normales de apertura y cierre, se mide el desplazamiento del muelle, calculándose el empuje correspondiente en el vástago en función de la relación establecida en el ensayo de calibración. Ver Figure 7

Figure 7 : Sistema de medida con sensor de par



Fuente 2 : Teledyne.Inc

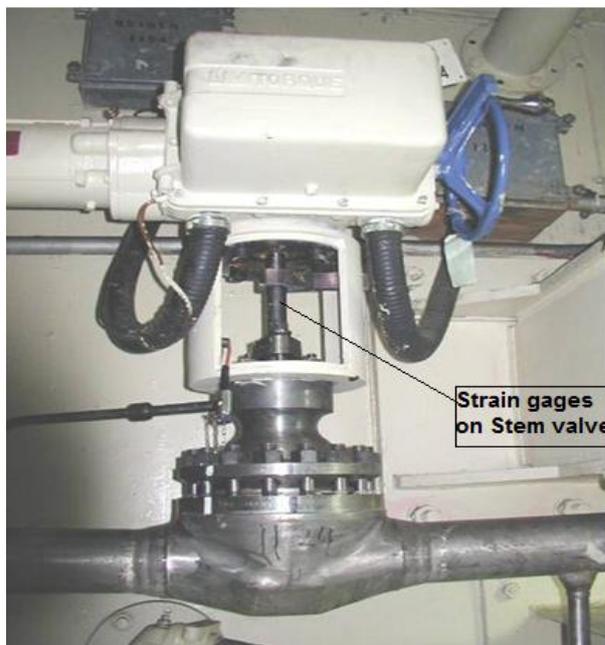
Este método presenta inconvenientes para la medida en condiciones dinámicas. La causa fundamental radica en la incapacidad del método para medir las variaciones de empuje que se producen en el vástago de la válvula como consecuencia de las condiciones de operación del sistema (presión diferencial a través del obturador básicamente), al variar el factor de vástago de forma impredecible con tales condiciones. Por lo tanto, si se utiliza este método, al estimar los empujes con la válvula en carga, se producirán errores difícilmente cuantificables, permaneciendo válido el sistema para medidas estáticas, es decir, sin presión ni caudal en la línea.

2.5.1.2. Métodos de diagnóstico basados en medidas mecánicas en la válvula, directas e indirectas

Los métodos más precisos de diagnóstico tratan de medir directamente los empujes en el vástago por técnicas diversas, entre las que se encuentran:

- a) Medida directa con galgas extensiométricas pegadas al vástago. Ver Figure 8

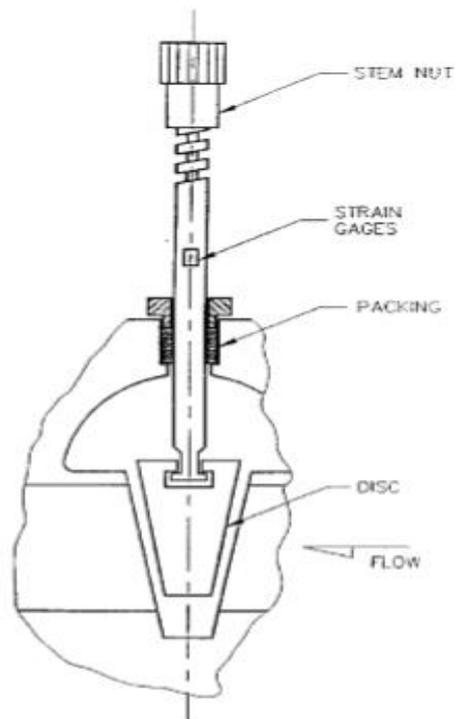
Figure 8: Posición montaje galgas extensiométricas en eje



Fuente 3: Elaboración propia.

- b) Medida directa con captadores resistivos y capacitivos acoplados al vástago para medir su deformación longitudinal o transversal, y que se emplean para medida directa o para calibración de captadores montados en el puente de la válvula. Ver Figure 9

Figure 9 : Esquema montaje galgas extensiométricas en eje



Fuente 4 : EPRI

- c) Medida indirecta con utilización de sensores de esfuerzos colocados en el puente o yugo de la válvula. Ver, Figure 10

Figure 10 : Posición montaje galgas extensiométricas en yugo



Fuente 5 : Elaboración propia.

Los dos métodos citados “a” y “b” no ven afectada su precisión por las condiciones de carga de la válvula dada la forma directa de medida de esfuerzos, lo que les hace en principio idóneos para la medida de esfuerzos en las condiciones más desfavorables postuladas de operación de la válvula.

De los métodos directos citados anteriormente el más preciso en principio es el “a”, si bien requiere la existencia de alguna zona lisa del vástago que sea accesible para poder pegar las bandas extensiométricas o la utilización de captadores tipo C-Clamps como el nuC de Crane[37] que son de aplicación en zonas roscadas del vástago.

El método indicado en “b” puede ofrecer también una buena precisión si se efectúa la medición en la zona lisa del vástago, donde la ley tensión-deformación es muy simple. Su aplicación en la zona roscada del vástago presenta el inconveniente de una ley tensión-deformación mucho más compleja y sujeta a variaciones en función del tipo de rosca, ya que

la distribución de tensiones en cualquier sección normal al eje del vástago no es uniforme, como en el caso de un cilindro liso.

No obstante, incluso cuando las bandas pueden ser colocadas en la zona lisa del vástago durante la carrera completa, el sistema sigue midiendo simultáneamente los empujes a través del desplazamiento del muelle, por aportar diversas ventajas.

La medida simultánea de empujes por dos métodos distintos supone una mayor garantía sobre la fiabilidad de los resultados ya que permite:

- Calibrar el interruptor de par de apertura en diferentes posiciones, afectando mínimamente al conjunto válvula actuador.
- Obtener la medida del desplazamiento del muelle, que resulta necesaria para un proceso completo de diagnóstico.

El equipo de diagnóstico permite además la adquisición simultánea de otros parámetros de proceso como temperaturas, presiones y caudales, de gran importancia para la realización de pruebas en condiciones de diseño del sistema.

El método indicado en “c” pueden ofrecer igualmente buenas precisiones, si bien en algunos casos se requiere el desmontaje del actuador y en otros requieren la colocación de bandas extensiométricas adicionales.

2.5.2. Métodos de diagnóstico basados en la medida directa de parámetros eléctricos

Los métodos de medida de parámetros eléctricos se clasifican en función del punto de adquisición de dichos parámetros, ya sean “in situ” (en la caja de conexiones del propio actuador) o desde el CCM. A su vez pueden clasificarse en métodos de medida periódica o con monitorización en continuo con equipos como el SENTRY de Teledyne[38].

La precisión, ventajas y desventajas de estos métodos son los mismos y aparecen como Motor Power Monitor en la Tabla 2 del apartado 2.5.4

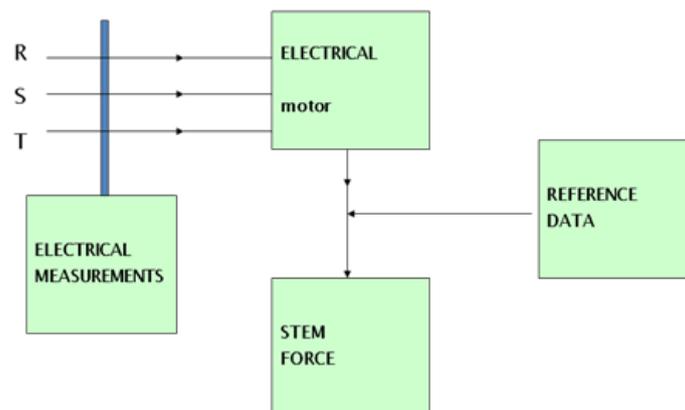
Los cambios de las características funcionales de una MOV pueden ser evaluados midiendo los parámetros eléctricos del motor de la válvula desde el CCM y comparados con los obtenidos con la primera diagnosis estática o dinámica de referencia.

Esta información de referencia se compara con las sucesivas medidas para observar la tendencia respecto de las características de funcionamiento.

Mientras la MOV no se someta a nueva intervención por mantenimiento correctivo o preventivo, sólo con las medidas eléctricas podemos verificar el estado funcional de la MOV y establecer en consecuencia las señales de alarma. (Nivel crítico y nivel límite).

La desventaja de la diagnosis desde CCM es que los parámetros eléctricos nos dan información del comportamiento global de la MOV (actuador y válvula) no permitiendo discernir si el mal funcionamiento corresponde a válvula o actuador. Sin embargo, el coste de instalación y diagnosis desde CCM es muy inferior a una diagnosis con verificación de esfuerzo y par.

Figure 11 : Esquema de bloques toma de datos



Fuente 6 : Tecnatom

2.5.3. Monitorización permanente del sistema de diagnosis

Esta técnica de diagnosis se ha utilizado en pocos casos por su costosa instalación en plantas que ya están en operación, aun así algunas plantas la han utilizado en MOV críticas para la seguridad situadas en zonas de difícil acceso con riesgos radiológicos para los técnicos.

Cabe la posibilidad de monitorizar únicamente las señales eléctricas con lo que se simplifica la instalación y se reducen los costes considerablemente. Aunque no se obtiene la misma fiabilidad del diagnóstico que la obtenida con la diagnosis que utiliza los parámetros de esfuerzos mecánicos, nos ofrece, sin embargo, la opción de establecer puntos de alarma para un primer control del Estado de la MOV partiendo de la diagnosis de referencia.

La monitorización permanente de la diagnosis de una MOV, desde el CCM o en local, se utiliza en válvulas que:

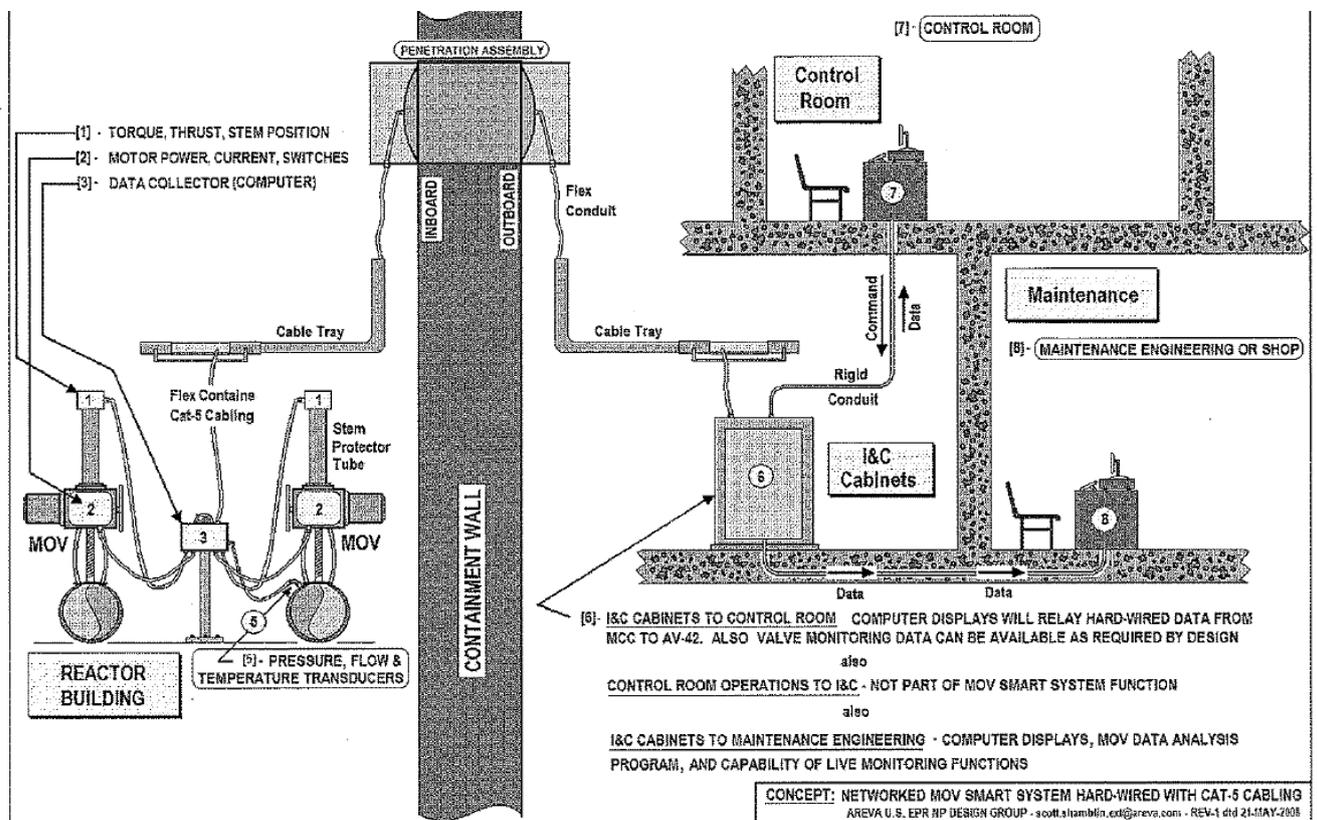
- a) Tienen bajo margen de seguridad respecto a los esfuerzos requeridos.
- b) Se considera necesario controlar su tendencia sobre el esfuerzo y/o par de actuación.
- c) Tiene una función significativa para la seguridad del equipo y/o la planta.
- d) Está localizada en un área de difícil acceso o limitada por condiciones ambientales.
- e) Requiere excesivas intervenciones de mantenimiento o tiene un alto ratio de fallos.
- f) Es crítica para el funcionamiento de la planta.
- g) Requiere una evaluación continua de su tasa de fugas en relación al esfuerzo en el eje.

Se puede observar, ver Figura 12, que esta disposición sería la de mayor complejidad y mayor coste ya que el supuesto es el de una MOV dentro del recinto del reactor en una central nuclear con todos los riesgos de acceso con la planta en funcionamiento. A partir de este supuesto, caben otras disposiciones con menos complejidad.

Cabría la posibilidad de una monitorización hasta un área exterior de fácil acceso sin tener que realizar la instalación para las señales hasta la sala de máquinas o sala de control.

Para una MOV de un buque que tenga las limitaciones expuestas anteriormente, la monitorización permanente no tendría la misma complejidad y el análisis de los resultados de diagnóstico puede realizarse por un ingeniero especialista desde la sede del armador enviando los datos con los medios de comunicación actuales (internet). En el buque bastaría con enviar los datos a un panel de alarmas y el estudio o visualización de la curva de tendencia.

Figura 12 : Esquema de monitorización on-line



Fuente 7 : Teledyne.Inc

2.5.4. Precisión de los distintos métodos de diagnosis

Se han realizado importantes avances técnicos con los equipos de diagnosis para distintos tipos de válvulas. Estos avances facilitan a los usuarios opciones distintas con diferentes precisiones, ventajas y desventajas. La instalación permanente de equipos de diagnosis permite una monitorización de las características de las MOV, minimizando la exposición a condiciones ambientales que afectan a las personas y mejorando la disponibilidad de la planta.

En la Tabla 2 : Tabla de precisiones y aplicación para los métodos de medida, se enumeran los distintos métodos de diagnosis especificando en la primera columna si es un sistema de medida directa o indirecta, en la segunda la precisión del método utilizado, en la tercera define el punto de medida, ya sea en el actuador (spring pack), en el puente (yoke) de la válvula, directamente en el eje (stem) de la válvula, en la base (brida de unión entre actuador y válvula) del actuador, y en el Centro de Control de Motores (MCC) donde únicamente se toman los parámetros eléctricos. Finalmente se mencionan las ventajas y desventajas de cada técnica.

Cabe resaltar que los más fiables en la toma de medida son los de medida Directa, ya sea con los equipos de diagnosis situados localmente próximos a las MOV o a distancia ver 2.5.3

El mejor método de diagnosis, y el que se aplica siempre que es posible, es el de medida directa de esfuerzos sobre el eje combinado con la medida de los parámetros eléctricos. Ver ANEXO 2 HOJAS DE DATOS E INFORMES DE DIAGNOSIS

Medir sólo los parámetros eléctricos es una técnica que se suele utilizar como control entre dos diagnosis espaciadas en el tiempo una o varias paradas para recarga de combustible en las centrales nucleares, aproximadamente 18 meses, o reconocimientos anuales en los buques. También se utiliza como sistema de medida directa aunque el diagnóstico que ofrece es menos preciso al no poder identificar claramente si el fallo procede de la válvula o del actuador.

Tabla 2 : Tabla de precisiones y aplicación para los métodos de medida

Diagnostic Method	System	Accuracy	Application	Advantages	Disadvantages
Spring pack displacement	Indirect	Inaccuracies as high 40%	Actuators	Easily performance	“Limitorque” actuator only
Strain measurement of the yoke legs	Indirect	It depend of calibration yoke strain before each test	When Strain measurement of the stem not possible	Not required any modification to the valve or actuator installed	Limited to the valves installed with the stem in the vertical orientation.
Strain measurement of the stem	Direct	As high as +/- 0.5%	Stem valve	The best direct method to determining strain. (globe and gate valve)	The strain gauges may interfere with valve stroking if insufficient stem length.
Load measurement at the actuator base	Direct	As high as +/- 0.5%	Actuator base	This method is commonly used to quarter-turn valves. (Butterfly and ball valves)	This method requires that the actuator be removed for mounting the sensors in existing plants.
Electric Motor Power Monitor	Direct	< 1% of reading	Connection motor box or MCC	Monitoring tendency motorperformance.	The trace can't be easily attributed to the either the valve o motor.

Fuente 8 : EPRI

2.5.5. Equipos de diagnosis para la adquisición y análisis de datos

Con los equipos de diagnosis se realiza la adquisición y análisis de los parámetros medidos con el fin de determinar el margen de seguridad o tasa de supervivencia de una MOV.

Los equipos de diagnosis realizan la adquisición de datos durante la maniobra de la válvula. Esta maniobra puede ser realizada desde un puesto de mando local o desde la Sala de Control, dependiendo del modelo de prueba elegido.

2.5.5.1. Adquisición de datos

Las señales captadas con los distintos sensores de los equipos de diagnosis pueden ser captadas, almacenadas y analizadas a través de los equipos de adquisición y los ordenadores del sistema de diagnosis.

Generalmente, estos sistemas de adquisición capturan las siguientes señales:

- a) Esfuerzos en el eje
- b) Par en el eje
- c) Corriente del motor
- d) Posición de los interruptores de par
- e) Desplazamiento del paquete de arandelas del actuador (Limitorque)
- f) Presiones
- g) Caudal
- h) Posición del eje
- i) Par del motor
- j) Velocidad del motor
- k) Presión en diafragma/pistón
- l) Nivel acústico
- m) Temperatura

Para cada una de estas señales existen en el mercado distintos fabricantes de sensores adecuados a la magnitud medida.

Con estas señales, y con la impresión acústica y óptica recogida por el personal que realiza la captación de datos, se puede llegar a emitir las recomendaciones necesarias para poner el conjunto de válvula-actuador en óptimas condiciones de funcionamiento.

2.5.5.2. Análisis de datos

Los datos obtenidos con estos equipos son sometidos a un análisis en dos vertientes diferentes:

- a) Para el mantenimiento predictivo/preventivo, evaluando el comportamiento de los registros.
- b) Para la implantación de los nuevos ajustes de los interruptores.

Por otra parte, para analizar los datos obtenidos durante el proceso de diagnosis se deben comparar los puntos característicos de los mismos con los datos base de partida o de diseño, suministrados por la ingeniería. Estos datos son el resultado de la revisión de las bases de diseño de la válvula y los teóricos de selección del operador (motor y actuador). Los puntos y valores considerados como característicos durante una maniobra de la válvula son los siguientes:

- 1) Despegue: Par / empuje-Consumo motor.
- 2) Fin by-pass: Tiempo.
- 3) Media carrera: Par / empuje-Consumo motor.
- 4) Actuación interruptor maniobra: Par / empuje-Tiempo / consumo motor.
- 5) Fin de maniobra: Par / empuje-Tiempo / consumo motor.

La comparación de los valores medidos en dichos puntos con los datos de partida, la evaluación del comportamiento de los registros de las variables adquiridas y la inspección visual de la válvula por el personal dedicado a la toma de datos permitirán emitir las recomendaciones oportunas de cara a un cambio de las partes del componente defectuosas, a corregir posibles deficiencias encontradas y a realizar los ajustes apropiados a la función requerida de la MOV según las bases de diseño establecidas.

Dicha comparación posibilitará también el establecimiento de los requerimientos de mantenimiento de cara al futuro, con la consiguiente ayuda a la hora de prever el “stock” de repuestos a mantener en cada caso y la duración de la intervención.

Los problemas mecánico-eléctricos detectables con los equipos de diagnosis son muy variados y se pueden localizar desde el motor del actuador hasta el cierre de la válvula, pasando por toda la cadena de transmisión de empuje del actuador.

Se expone una lista de los posibles defectos mediante la apreciación directa del equipo humano encargado de las pruebas y en base a su experiencia.

Directamente del comportamiento de los datos se podrían sacar conclusiones en cuanto a:

- a) Tarado incorrecto de interruptores del actuador (by-pass, par, fin de carrera).
- b) Holgura en el paquete de arandelas o precarga incorrecta del mismo, en el actuador.
- c) Apriete incorrecto de la empaquetadura.
- d) Inercia excesiva.
- e) Tuerca de roce excesivamente apretada o suelta.
- f) Husillo desgastado, doblado o roto.
- g) Engranajes desgastados o rotos.
- h) Problemas de grasa (lubricación deficiente).
- i) Rodamientos desgastados o rotos.
- j) Actuadores dimensionados impropiaamente. Aplicación de fuerza excesiva en el asiento (clavado o despegue en el asiento de la válvula).
- k) Interruptores de final de carrera o par defectuosos.

2.5.6. Fabricantes de los equipos de diagnóstico para MOV

Con la exigencia de la NRC sobre la verificación del *margen de seguridad* de las MOV, las empresas de ingeniería del sector nuclear desarrollaron los primeros equipos de diagnóstico que empezaron a utilizarse a partir de 1989 con la aplicación de la GL 89-10. Algunos de ellos se mencionan más abajo en este apartado. Sin embargo, algunas empresas eléctricas como EDF desarrollaron sus propios sistemas o en colaboración con empresas de servicios como AREVA, TECNATOM y otras. Los propios fabricantes de actuadores, como LIMITORQUE, ofrecieron sistemas de diagnóstico con la medida del esfuerzo aplicado sobre el spring pack. Ver: Métodos de diagnóstico

También aparecieron métodos de medida menos precisos como la medida de parámetros eléctricos del motor, localmente o a distancia. Ver 2.5.3.

Diversos productos y equipos de diagnóstico pueden encontrarse en el mercado de servicios de ingeniería especializada.[38][39][40][41][42]

Algunos de ellos los mencionamos a continuación:

- a) Se incluyen algunos ejemplos de equipos de Teledyne INC.:
 - Quiklook 3-FS: <http://teledyne-ts.com/products/quiklook3.html>
 - MIDAS: <http://teledyne-ts.com/products/midas.html>
 - Sentry: <http://teledyne-ts.com/products/sentry.html>
 - Smartstem: <http://teledyne-ts.com/products/smartstem.html>
- b) Crane. (Votes® Infinity Valve Diagnostic System)
<http://www.cranenuclear.com/index.cfm?objectid=701E58D5-E64C-018C-F142ED5D74D7E545>
- c) Kalsi engineering. (MOV test stand): <https://www.kalsi.com/about/engineering-index/>

2.5.7. Informe de diagnosis y criterios de aceptación

En el ANEXO 2 HOJAS DE DATOS E INFORMES DE DIAGNOSIS se adjuntan como ejemplo la Metodología de cálculo de esfuerzos, la Hoja de Datos de Ingeniería con los criterios de aceptación para una válvula MOV de compuerta y el Informe de una diagnosis estática As-Found y su correspondiente diagnosis As-Left, realizada por TECNATOM, después de la ejecución de la tarea de revisión por mantenimiento.

2.5.7.1. Metodología de cálculo de esfuerzos requeridos sobre el eje de la válvula

La metodología de cálculo de esfuerzos requeridos se recoge en los documentos del EPRI [43] y [15].

En dichos documentos se detallan las ecuaciones para el cálculo de esfuerzos en las válvulas de compuerta y globo, por un lado, y para las válvulas de mariposa por otro.

Los resultados de estos cálculos se utilizan con los siguientes propósitos:

- Definir el esfuerzo requerido bajo las condiciones especificadas de caudal, temperatura y presión en los casos de apertura y cierre, punto inicial de acuñaamiento, esfuerzo para alcanzar el sellado requerido y desacuñaamiento.
- Evaluación del dimensionado del conjunto válvula/actuador.

- Comprensión de la importancia de las magnitudes relativas de los diferentes componentes del esfuerzo en el eje de la válvula.
- Evaluación del control lógico de la válvula y sus puntos de consigna.

2.5.7.2. Hoja de datos de Ingeniería

En la hoja de datos de Ingeniería se establecen los criterios de aceptación requeridos para la prueba de diagnóstico de cada MOV en particular. En dicho documento se establecen los criterios requeridos de aceptación, los criterios de referencia, así como las características técnicas del vástago de la válvula y el tipo de paquete de muelles que monta su actuador.

2.5.7.3. Informe de diagnóstico estática

En el informe de resultados de la diagnosis se presenta una hoja resumen del informe para cada prueba anterior y posterior a los trabajos de mantenimiento realizados sobre la válvula y el actuador, si es el caso. Por lo tanto, el informe contendrá dos hojas resumen correspondientes a la diagnosis As-Found y a la diagnosis As-Left, ambas con los datos de sus respectivas carreras de apertura y cierre.

Los datos obtenidos deben estar dentro de los criterios de aceptación definidos en la hoja de datos de Ingeniería.

En este caso, el equipo de diagnosis utilizado ha sido el Quiklook 3-FS de Teledyne.

2.6. Evolución de las hipótesis de diseño para la diagnosis de las MOV

Desde los años 80 y desde que se detectaron los fallos operativos en las válvulas, a raíz del accidente de TMI, la NRC y el CSN adoptaron medidas conducentes a garantizar la fiabilidad de las mismas durante el ciclo de vida de las centrales.[2][3]

Con el retorno de experiencia de las centrales, tanto en USA como en otros países como España, que se acogieron al PPM de EPRI, la diagnosis de válvulas se ha implantado como una tecnología de CBM imprescindible para garantizar la seguridad y fiabilidad de las plantas redundando por ello en la disponibilidad de las mismas.

La evolución de los criterios de diseño de las MOV se ha ajustado al retorno de experiencia en las distintas centrales desde que se iniciaron las primeras pruebas de diagnóstico.

En definitiva, en este apartado se relacionan cronológicamente los eventos que se sucedieron a partir del análisis realizado por la NRC sobre el accidente de TMI, de las pruebas realizadas por Westinghouse con el fin de identificar la causa de los fallos sobre las MOV, las consiguientes pruebas dinámicas encargadas por la NRC y el inicio del programa de comprobación de las MOV exigido a través de las GL 89-10 y GL 96-05.

Una vez realizadas las primeras pruebas estáticas y dinámicas de las MOV a partir de 1989, se obtuvieron conclusiones que llevaron incluso a la revisión de los criterios base de diseño de los sistemas donde estaban instaladas las MOV, sobre los criterios de dimensionamiento de las propias MOV, tanto del actuador como de la válvula, y de los criterios de aceptación de los datos obtenidos de las diagnósticos que originalmente pudieran ser excesivamente conservadores.

La conclusión de todo este proceso de implantación del Programa de verificación de las MOV con la tecnología de diagnóstico supuso no sólo la revisión de los criterios de diseño sino también de los Planes de mantenimiento de las MOV, introduciendo para estas el mantenimiento CBM con la tecnología de diagnóstico y subordinando el mantenimiento preventivo clásico a los resultados del predictivo. Todo ello ha supuesto una evolución del plan de mantenimiento desde 1989 hasta la actualidad con el retorno de experiencias obtenido. En el apartado 2.7.3 , se expone la evolución mencionada más arriba e incluso los planes previstos para los próximos 20 años de operación de las plantas.

2.6.1. Respuesta al accidente de TMI

En respuesta al accidente de TMI la NRC se emitió el IE Bulletin 81-02 “Failure of Gate Type Valves to Close Against Differential Pressure”, donde se analizaron los fallos ocurridos en la válvulas de compuerta por efecto de la presión diferencial.

2.6.2. Programa de Westinghouse

A partir del análisis de la NRC, Westinghouse realizó un programa de pruebas en Condiciones Base de Diseño y se identificó que:

- a) El factor de válvula era superior al inicialmente utilizado en diseño para dimensionar la capacidad de los actuadores.
- b) Se identificó un nuevo efecto de degradación llamado “Rate-of-Loading”, que consiste en la variación de eficiencia de conversión de par a empuje entre pruebas estáticas y pruebas dinámicas en condiciones de diseño.
- c) Se identificó el efecto de actuaciones repetidas de la válvula o “pre-conditioning.”

2.6.3. Las pruebas dinámicas

La NRC encargó la realización de pruebas dinámicas con el objetivo de aclarar los motivos de los sucesivos fallos que se estaban produciendo en la industria, se recogen en el “Information Notice 90-40: Blowdown Test on Wedge Gate Valves” con las conclusiones siguientes:

- a) Los factores de válvula de diseño utilizados son NO-conservadores.
- b) El empuje requerido para actuar la válvula son significativamente mayores que los inicialmente previstos
- c) Se pueden producir daños significativos en internos de válvulas en condiciones de alto caudal (Blowdown).
- d) Efecto del Rate-of-Loading puede reducir significativamente el empuje suministrado para un ajuste del limitador de par en condiciones dinámicas.
- e) El factor de husillo variable en función de la carga.
- f) Pruebas en condiciones de baja Presión Diferencial no son indicativas de un correcto funcionamiento a altas presiones.

2.6.4. GL 89-10

Ante esta situación la NRC emite la GL³² 89-10 (y 7 suplementos): “Safety Related MOV Testing and Surveillance”, que se puede considerar el origen del programa de Válvulas motorizadas, donde se solicitaba a las plantas por primera vez que definieran un programa

³² GL: Generic Letter

para garantizar que las válvulas estuvieran correctamente dimensionadas y ajustadas para cumplir con su función de seguridad, para ello se solicitó que:

- a) Revisaran las Bases de Diseño: este documento debe incluir análisis de presión diferencial tanto para apertura como el cierre.
- b) Revisar periódicamente el ajuste correcto de las VM durante la vida de la planta.
- c) Realizar pruebas en condiciones dinámicas cuando sea posible.
- d) Mejorar las evaluaciones de los fallos en VM

2.6.5. GL 96-05

A mediados de los 90, se emitió la GL 96-05: “Periodic Verification of the Design Basis Capability of Safety Related Motor-Operated Valves” donde se transfirieron los requerimientos de verificación periódica y cerrando la GL 89-10.

En la GL 96-05 se abre la puerta a la posibilidad de agrupar válvulas por tipo y diseño para determinar efectos de envejecimiento.

La industria americana con el fin de unificar esfuerzos y minimizar el tiempo necesario para implantar la GL se agrupa en el Joint Owners Group.

El objetivo del proyecto del JOG era desarrollar un programa que diera cumplimiento a los requisitos de la GL 96-05 y diera respuesta a las degradaciones asociadas al envejecimiento de las válvulas de compuerta, globo y mariposa.

El programa se desarrolló en 5 años en los cuales se realizaron 513 pruebas dinámicas a un total de 176 válvulas implicando a 98 reactores.

2.6.6. Metodología del informe MPR2524A

Finalmente se sintetizaron los resultados en el informe Jog Mov Periodic Verification Program MPR2524A (2006) donde se recoge la metodología a seguir para determinar a qué grupo de válvulas ensayadas se puede asimilar cada válvula y las categorizó en cuatro grupos:

- a) Categoría A: válvula no susceptible de efectos de envejecimiento equivalente a una válvula ensayada en el JOG Program. Para definir el intervalo entre pruebas se considera que tienen alto margen.
- b) Categoría B: válvula no susceptible de efectos de envejecimiento que no ha sido ensayada en el JOG Program pero que puede asimilarse a una de ellas por criterio de ingeniería.
- c) Categoría C: Válvulas susceptibles de efectos de envejecimiento que pueden ser reclasificadas como A o B, pero necesitan acciones.
- d) Categoría D: válvulas que no han sido probadas dentro del alcance del JOG Program. Las plantas son las responsables de desarrollar una justificación adecuada.

Los resultados implican un aumento significativo de los coeficientes de fricción internos de las válvulas con el consecuente aumento de los esfuerzos requeridos para garantizar el cierre.

Con esta metodología de ingeniería se contó con la posibilidad de justificar el análisis de las MOV que no eran accesibles para la realización de la diagnosis pero que podían quedar amparadas por las comprobaciones de otras válvulas que si se ensayaron.

2.6.7. Revisión de las hipótesis de diseño

Algunas centrales españolas contrataron la categorización y la evaluación de márgenes a Westinghouse-USA, tras finalizar el trabajo se identificó que aproximadamente un 30% de las válvulas no disponían de margen suficiente para poder garantizar su actuación en condiciones Base de Diseño bajo las hipótesis del JOG³³, es decir se categorizaron como “C”.

Adicionalmente, y durante este proceso se identificaron una serie de deficiencias en las hipótesis de trabajo, que en su mayoría introducían conservadurismos excesivos, y en la metodología de cálculo de ventana de ajuste.

Tras realizar un análisis de sensibilidad de las válvulas comprometidas y de la situación global se diseñó un plan de acción para abordar la tercera fase del proyecto.

³³ JOG: Joint Owners Group

Objetivos de la revisión de las hipótesis de diseño [3]:

- a) Reevaluar las Bases de Diseño: hasta la fecha se habían realizado para todas las válvulas, pero por diferentes suministradores con criterios de evaluación distintos. Las centrales definen los criterios de trabajo: documentación de referencia, hipótesis, etc.
- b) Voltaje reducido: se postulaba que las válvulas con señal automática del sistema de Inyección de Seguridad o pérdida de suministro exterior trabajaban al 80% del voltaje nominal.
- c) Se reevalúa la tensión mínima en la que debe operar la válvula teniendo en cuenta los transitorios y la caída de tensión de los cables hasta la válvula para todas las válvulas tanto en la maniobra de apertura como cierre.
- d) Límite estructural de las válvulas: reevaluar los límites estructurales y completar aquellos en los que no se disponía de un cálculo específico.
- e) Revisión de cálculos de ajuste para:
 - Estandarizar la metodología de cálculo de ventanas de ajuste acordes con la metodología de cálculo que se utiliza en USA adecuada a la realidad de las plantas españolas.
 - Crear un procedimiento interno en las centrales donde se defina claramente el método de cálculo.
 - Diseñar e implantar las modificaciones necesarias que surjan de los dos puntos anteriores.

2.7. Optimización y planificación a largo plazo de la diagnosis de las MOV

En este apartado se presenta la planificación del plan de mantenimiento para las MOV con la integración de la tarea de diagnosis de válvulas ver (28). En las centrales nucleares de ANAV³⁴ se inició la aplicación de la diagnosis en 1989 y se ha ido actualizando hasta el 2017, año en el que se realiza la revisión de la planificación con proyección para los próximos 20 años.

Inicialmente se estableció el Programa Predictivo de Mantenimiento (PPM) de las MOV integrando la nueva tarea de diagnosis en el Plan de Mantenimiento y respetando las frecuencias de las tareas de mantenimiento preventivo. Con la experiencia recogida de los

³⁴ ANAV: Asociación Nuclear Ascó Vandellós

primeros cinco años, se fueron modificando las frecuencias de las tareas de preventivo en función del margen de seguridad o tasa de supervivencia de cada MOV.

Más tarde, el EPRI recogió el retorno de experiencia de numerosas centrales nucleares acogidas al PPM y elaboró unas plantillas de mantenimiento integrando todas las tareas con la recomendación de crear una base de datos MBA para facilitar el análisis de los resultados e identificar los fallos potenciales.

Con la perspectiva de ampliación de vida útil de las centrales nucleares de 40 a 60 años, las empresas eléctricas han iniciado la preparación de las nuevas propuestas sobre los planes de mantenimiento de las MOV, tal como se muestra en apartado 2.7.3

2.7.1. Planificación inicial

Desde la introducción en 1989 de la tecnología de diagnóstico de válvulas motorizadas en el CBM de las MOV se establecieron las tareas de diagnóstico en las paradas de recarga de las centrales con el criterio, básicamente, de que su tasa de supervivencia garantizara la fiabilidad del ESC.

Dichas tareas se definieron con las frecuencias requeridas una vez diagnosticadas las MOV por primera vez, ya sea con una diagnosis estática o una diagnosis dinámica, en función de la GL 89-10 [28] y/o de la GL 96-05 [29]

Las tareas de diagnóstico se establecieron con frecuencias de “recargas” adecuándolas a las tareas clásicas de mantenimiento preventivo, ya sea de la válvula propiamente dicha como del actuador. Es decir, se respetaron las frecuencias de las tareas de mantenimiento, mecánico, eléctrico y de instrumentación, previamente establecidas con las recomendaciones de los suministradores de los ESC (8) integrando a posteriori las tareas de diagnóstico estáticas o dinámicas gradualmente.

Pasado un primer ciclo de unos 5 años aproximadamente y con el retorno de experiencia del conjunto de tareas de mantenimiento y diagnóstico, se fueron adecuando las frecuencias de las tareas priorizando el criterio de su tasa de supervivencia y aumentando por ello su fiabilidad.

Por otra parte, para realizar cualquier tarea de un ESC durante las paradas de recarga de combustible de las centrales, se debe preparar el correspondiente “descargo”, específico para cada intervención, con afectación del sistema en el que se encuentre instalada la MOV y estudiando evitar en lo posible el llamado “camino crítico de la recarga” lo cual condiciona el inicio de la puesta en servicio de la central. Históricamente, las tareas de las MOV se han gestionado de forma independiente si tener en cuenta las posibles interferencias con otros ESC salvo en la preparación de los descargos de cada sistema o sub-sistema que gestionan el departamento de planificación de Mantenimiento y el departamento de Operación de la planta.

2.7.2. Introducción en el Mantenimiento Preventivo de las Bases de datos de las Plantillas por componentes de EPRI

En 1998 se publicó por EPRI el Informe sobre el Mantenimiento Preventivo [44], dentro del cual se estudiaban entre otros ESC las MOV y las AOV.

2.7.2.1. Objetivos

En dicho documento se analiza el mantenimiento preventivo utilizado hasta el momento, siguiendo las recomendaciones de los fabricantes de válvulas y actuadores, así como la aplicación de la metodología RCM utilizada y se realiza una nueva propuesta partiendo del retorno de experiencia de las plantas con el fin de establecer la relación entre los fallos observados en los equipos y las distintas tareas de mantenimiento realizadas, contemplando tanto el alcance de estas como su frecuencia de aplicación. Entre las tareas estudiadas se analizan tanto las de mantenimiento preventivo como las de predictivo que en las MOV es la tecnología de diagnóstico de válvulas.

El retorno de experiencia se recogió a través de los distintos Paneles de Expertos de las centrales formados por ingenieros especialistas de mantenimiento, Ingeniería de diseño (Servicios técnicos), departamento de Inspección en servicio y Servicio de operación, así como los suministradores de los equipos y las empresas e ingenierías de servicios.

El objetivo final perseguido por el documento de EPRI mencionado más arriba fue en primer lugar recoger la experiencia de las centrales y determinar el coste del PM³⁵ y en segundo lugar establecer la relación entre la degradación de los distintos ESC estudiados y los factores que provocaron dicha degradación, así como la progresión de los fallos en función del tiempo.

2.7.2.2. Metodología utilizada

Partiendo del retorno de experiencia del mantenimiento en las centrales durante más de 30 años, que como se ha expuesto más arriba se inició con la utilización de la metodología RCM y la aplicación del mantenimiento recomendado por los fabricantes de los ESC, los Paneles de Expertos establecieron las plantillas de mantenimiento para cada tipo de ESC evitando o cambiando las frecuencias de las tareas más intrusivas y definiendo otras nuevas de menor impacto en la disponibilidad pero manteniendo en su conjunto la fiabilidad.

Así pues, se ampliaron las frecuencias de aplicación en las tareas más intrusivas como las revisiones generales de las válvulas y los actuadores de las MOV, con lo que por otra parte redujeron las indisponibilidades causadas por dichas revisiones y además se crearon nuevas tareas menos intrusivas como:

- Inspección mecánica y engrase de la válvula.
- Inspección eléctrica del actuador

En el caso de las MOV además, se ajustaron las frecuencias de las tareas intrusivas a frecuencias múltiplo de las diagnósis de válvulas para reducir los descargos de los sistemas para la realización del mantenimiento y la diagnóstico.

La metodología utilizada se basó en la clasificación de los ESC y en este caso de las MOV con los siguientes criterios de clasificación:

³⁵ PM: Preventive maintenance

- Criticidad (4): La criticidad de una MOV viene definida por la importancia del sistema a la cual pertenece y la función de la misma dentro de él. Se clasifican en tres niveles, Alta (C1 y C2) para los relacionados con la seguridad y Baja para el resto.
- Ciclos de servicio: Este concepto determina el número de actuaciones que tiene una MOV en cada ciclo de operación (18 meses en una central). Se clasifican en Alta (Severa) o Baja (Normal).
- Condición de servicio: Se determina en función de las condiciones ambientales y de operación del sistema. (Temperatura, presión, radiación, etc.)
- Riesgo: Se define como la importancia que tiene una MOV para la parada segura de la planta. Este es un concepto exigido por el regulador CSN. Se definen tres niveles Alto, Medio y Bajo

Además se estudiaron para cada MOV, los fallos y degradaciones de sus componentes así como las causas que los provocaron para finalmente establecer un PM adecuado.

En función de todo ello, EPRI estableció las Plantillas de mantenimiento para cada tipo de ESC y en concreto la correspondiente a las MOV.

EPRI también recomendó la creación de una base de datos MBA³⁶ para la monitorización de los resultados de las intervenciones o tareas y así poder establecer la relación entre los fallos y sus causas, así como la tendencia de los parámetros respecto al tiempo y poder predecir el fallo y en consecuencia anticipar la intervención de mantenimiento.

2.7.3. Planificación a largo plazo

Las centrales nucleares españolas se diseñaron para un período de vida útil de 40 años y actualmente se están presentando los informes de recualificación para un período de 60 años.

En lo que concierne a las MOV y AOV de las centrales catalanas de ANAV se presentó en la 43 reunión anual de la SNE³⁷ la ponencia “Programa de actividades de Válvulas motorizadas: Optimización y planificación a largo plazo”[45]

³⁶ MBA: Maintenance Benefit Analysis

³⁷ SNE: Sociedad Nuclear Española

Con el retorno de experiencia de las centrales nucleares sobre la diagnosis de válvulas motorizadas se actualizan las tareas conjuntas de las distintas especialidades de mantenimiento y de Ingeniería, así como con los requisitos del manual de inspección de servicio.

- Objetivo: *“El plan estratégico de ANAV para el periodo 2016-2020, define los objetivos de la empresa y los planes de actuación que van a llevar al cumplimiento de los mismos”* [45]

“Este proyecto se enmarca en los planes de actuación de Fiabilidad de planta y de Eficiencia y Eficacia operativa, el cual consiste en desarrollar el programa de Válvulas Motorizadas que englobe de forma centralizada las tareas de mantenimiento preventivo y las tareas regulatorias, como la diagnosis”[45]

- Criterios: La optimización y planificación a largo plazo de las MOV se realizó en base a los siguientes criterios:
 - Fiabilidad de equipos
 - Optimización de frecuencias de intervención
 - Interferencias en la gestión de recargas
 - Homogeneización de la carga de trabajo

- Conclusiones

“Este proyecto ha permitido elaborar una planificación de actividades en recarga a largo plazo (60 años de operación), unificando las principales intervenciones que se realizan en las MOV en un solo documento, independientemente de la unidad organizativa responsable”[45]

La integración de las plantillas ER³⁸ (recomendadas por EPRI que recogen el retorno de experiencia de ANAV) ha permitido reducir las tareas más invasivas creando otras que no requieren desmontaje pero que repercuten positivamente en la fiabilidad del componente.

Entre las estrategias estudiadas bajo el punto de vista de fiabilidad del componente MOV y la minimización de costes se optó por aumentar la frecuencia de diagnosis de forma que sea múltiplo de las frecuencias de revisión con desmontaje del actuador y de la válvula. Esta estrategia representa:

- Una mayor fiabilidad del componente al aumentar la frecuencia de diagnosis
- Una reducción de las intervenciones de revisión de actuador y válvula
- Un ahorro del coste directo de mantenimiento

³⁸ ER: Equipment Reliability

El modelo de plantilla de PM está en función de la Condición de servicio y del Riesgo tal como se expone en la Tabla 3

Tabla 3 : Plantilla PM de ANAV

	Frecuencia (Ciclos)			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Condición de servicio	Severo	Severo	Normal	Normal
Riesgo	Alto	Media o Baja	Alto	Media o Baja
Revisión Actuador	6	6	8	8
Revisión Válvula	12	12	16	16
Diagnosis	3	6	4	4

Fuente 9: Xavier Pujol (ANAV)

Podemos concluir que desde la entrada en vigor de la GL89-10 en 1989 con la aplicación de las diagnosis estáticas y la GL96-05 con la aplicación de las diagnosis dinámicas, la estrategia de mantenimiento de las MOV ha ido ajustándose al histórico de los resultados obtenidos, de forma que la tecnología de diagnosis se ha demostrado como la herramienta fundamental para garantizar la fiabilidad y la reducción de los fallos.

Por otra parte, el mantenimiento tradicional más intrusivo y de elevado coste, como las revisiones generales de válvula y actuador, se ha ido reduciendo, repercutiendo globalmente en la disminución de costes.

Finalmente, esta es la estrategia de mantenimiento adoptada por ANAV a partir de 2017 y con la perspectiva de la ampliación de vida de las centrales a 60 años.

2.8. Metodología seguida para la implantación de la diagnosis en las MOV en las centrales nucleares

A lo largo del Capítulo II se han expuesto en los diferentes apartados los conceptos fundamentales de mantenimiento, los antecedentes sobre la diagnosis de las MOV, los

distintos métodos de diagnosis disponibles ya sean directos o indirectos con sus precisiones, y la evolución de las hipótesis de diseño.

Parece coherente dedicar este apartado a sintetizar la metodología seguida para la implantación de la tecnología de diagnosis de válvulas una vez que se estableció el CBM como estrategia de mantenimiento en las centrales a la vez que se implantó la técnica RCM.

2.8.1. Requisitos previos para la implantación de la diagnosis en las MOV

La situación anterior a la implantación de la estrategia CBM en las centrales se fundamentaba en el mantenimiento preventivo por frecuencias periódicas siguiendo las recomendaciones de los fabricantes y la clasificación de los sistemas y equipos establecida con la metodología RCM ver Mantenimiento centrado en la Fiabilidad

Siguiendo el PPP de EPRI, ver Objetivo del Performance Prediction Program (PPP) se propuso la diagnosis de válvulas como estrategia CBM.

Una vez que la industria dispuso de los distintos métodos o técnicas de diagnosis para las MOV, ver apartado 2.5, se estableció por la Ingeniería de Mantenimiento una metodología de trabajo sabiendo que las plantas estaban en operación y basada en los siguientes pasos:

- 1) Análisis y verificación de los criterios de diseño del sistema.
- 2) Verificación de los criterios de dimensionamiento de las MOV (Válvula y actuador)
- 3) Estudio de accesibilidad de las MOV
- 4) Justificación de la Ingeniería de diseño para los casos de imposibilidad de implantar la tecnología de diagnosis en algunas MOV. Ver 2.6.6
- 5) Análisis del método de diagnosis más adecuado (directo o indirecto) para cada MOV.
- 6) Aplicación de la GL 89-10 y la GL 96-05
- 7) Definición de las frecuencias de diagnosis en función del margen de seguridad y nivel de criticidad de cada MOV.
- 8) Adecuación del mantenimiento preventivo con desmontaje a los resultados obtenidos por diagnosis. Planificación de las tareas de mantenimiento no intrusivas.
- 9) Establecimiento de las bases de datos en función de las plantillas de mantenimiento de EPRI. Ver 2.7.2
- 10) Control periódico del Margen de Seguridad o Tasa de Supervivencia de cada MOV con los indicadores RCI y RCP.

Con todas las conclusiones que se obtuvieron de la metodología de trabajo de los diez puntos anteriores se diseñó un Plan de mantenimiento específico para las MOV.

2.8.2. Metodología de diagnóstico para la verificación del estado de las MOV

El objetivo de la diagnosis de válvulas es evaluar la *condición* en un momento determinado para verificar que la capacidad del actuador supera el máximo esfuerzo de actuación requerido por la válvula, estableciendo el *margen de seguridad o tasa de supervivencia*, que garantice la disponibilidad de la misma hasta la siguiente revisión por mantenimiento programado y/o por la parada de la planta.

En función del análisis previo realizado por la Ingeniería de Mantenimiento y de los requisitos de cada MOV, se estableció el método de diagnosis más adecuado. En dicho análisis se definen los parámetros que deben controlarse con la diagnosis, ya sea con diagnosis estáticas o dinámicas, en al menos un ciclo, verificando las carreras de apertura y cierre.

Tal como se menciona en el apartado 2.5, la adquisición de datos durante la maniobra de la válvula puede ser realizada desde un puesto de mando local “in situ” o desde la Sala de Control, dependiendo del método de diagnosis elegido. Básicamente los datos capturados por un equipo de diagnosis son los siguientes:

- a) Empuje/par proporcionados por el actuador frente al tiempo.
- b) Actuación de los interruptores de posición del actuador frente al tiempo.
- c) Característica de los interruptores de par frente al tiempo.
- d) Parámetros eléctricos del motor frente al tiempo.

Por otra parte, para analizar los datos obtenidos durante el proceso de diagnosis se deben comparar los valores de los parámetros característicos de las MOV con los datos base de partida o de diseño, suministrados por la ingeniería. Estos datos son el resultado de la revisión de las bases de diseño de la válvula y los teóricos de selección del actuador (motor+actuador).

Los puntos y valores considerados como característicos durante una maniobra de la válvula son los siguientes:

- 1) Despegue: Par / empuje y Consumo motor.
- 2) Fin by-pass: Tiempo.
- 3) Media carrera: Par / empuje y Consumo motor.
- 4) Actuación interruptor maniobra: Par / empuje / Tiempo / consumo motor.
- 5) Fin de maniobra: Par / empuje / Tiempo / consumo motor.

La comparación de los valores medidos en dichos puntos con los datos de partida junto con la evaluación del comportamiento de los registros de las variables adquiridas y la inspección visual de la válvula por el personal dedicado a la toma de datos permitirán emitir el diagnóstico y las recomendaciones oportunas de cara a un cambio de las partes de los componentes defectuosos. Todo ello servirá para corregir las posibles deficiencias encontradas y para realizar los ajustes apropiados a la función requerida de la MOV según las bases de diseño establecidas.

Por otra parte, los distintos métodos de diagnosis disponibles se han dividido en directos e indirectos y clasificado en función de su precisión en la Tabla 2, del apartado *Diagnosis de Válvulas Motorizadas*. En dicho apartado se especifica no sólo la precisión del método sino también sus ventajas y desventajas.

Una vez que se ha definido para cada MOV el método de diagnosis y sus condiciones operacionales correspondientes al sistema donde se encuentre instalada, se realiza una primera diagnosis de referencia que representará su mayor tasa de supervivencia posible. En función de dicha tasa se establece su frecuencia de aplicación, definida por períodos de paradas de recarga y se precisan las tareas de mantenimiento preventivo no intrusivas que no afecten a los ajustes establecidos por la diagnosis.

También formarán parte del Plan de Mantenimiento de cada MOV las tareas de revisión parcial o general que estarán condicionadas por los resultados de la diagnosis. En estos casos, se realiza una diagnosis antes del desmontaje como *As-found* y después de la revisión se realiza una diagnosis *As-left* que será la nueva diagnosis de referencia a partir de ese momento.

2.8.3. Seguimiento de la Condición de las MOV

Para realizar el seguimiento de la *condición o estado* de una MOV se utiliza, por un lado, el histórico de mantenimiento incorporado en el sistema de gestión con sus bases de datos y por otro, los Indicadores que se han mencionado en el apartado, 2.1.4

Tanto el RCI como el RCP son indicadores que para el caso de una MOV están referenciados a la adquisición de datos de la diagnosis con su diagnóstico específico y valorando su *tasa de Supervivencia* y su tendencia. El control de la tendencia puede realizarse cuando se considere, con una monitorización continua de dichos parámetros fijando las alarmas del nivel crítico y el nivel límite o con las diagnosis consecutivas en un instante determinado.

Con estos indicadores se puede programar el momento en que se deberá realizar una tarea con desmontaje sin sobrepasar el valor crítico del indicador y garantizando la fiabilidad operacional de la MOV sin riesgo para la seguridad ni de indisponibilidades.

2.8.4. Plan de mantenimiento de las MOV con la estrategia CBM

Una vez que se ha definido la estrategia de mantenimiento de las MOV basada en el CBM con apoyo de la tecnología de diagnosis de válvulas y con el retorno de experiencias de la Ingeniería de mantenimiento de las centrales nucleares y el Know-How de los fabricantes e Ingenierías de servicios especializados en dicha tecnología, se establece y actualiza el Plan de Mantenimiento. En este apartado se expone la evolución del Plan de Mantenimiento desde la fase inicial de implantación hasta la planificación a largo plazo prevista en 2017.

CAPÍTULO III. Análisis de las válvulas en los sistemas del buque

El objetivo fundamental de este capítulo es analizar los sistemas del buque para identificar las válvulas que tienen actuador con motor eléctrico y los sistemas en los que están instaladas. En dichas válvulas es en las que se considera potencialmente aplicable la diagnosis de válvulas. También se realiza una introducción sobre los distintos tipos de actuadores que pueden encontrarse en la industria. Por último, se incluye un apartado sobre la justificación del mantenimiento CBM en los buques.

3.1. Introducción sobre los tipos de actuadores

Los actuadores de las válvulas pueden ser neumáticos, hidráulicos o eléctricos y su elección dependerá de diferentes factores como la velocidad de apertura y cierre, su accesibilidad, las condiciones ambientales de su ubicación y las funciones del conjunto válvula-actuador, ya sean de apertura y cierre y/o de regulación, entre otros requisitos.[46]

Si bien las válvulas de control automático suelen ser neumáticas, para las funciones de apertura y cierre se suelen seleccionar más bien actuadores hidráulicos o eléctricos.

Los actuadores hidráulicos son de construcción simple y robusta con un mínimo de componentes mecánicos. Su ventaja fundamental respecto de los motorizados es su mayor velocidad de apertura y cierre. Sin embargo, el cierre excesivamente rápido puede provocar el efecto perverso del golpe de ariete en la línea.

Por otro lado, un posible problema con respecto a los actuadores hidráulicos es su falta de precisión para controlar el empuje al cierre en el eje de la válvula de compuerta pudiendo dañar el asiento y provocar, a la larga, fugas no deseadas u otros daños en la válvula.

Estos problemas, por el contrario, se evitan utilizando actuadores eléctricos los cuales pueden ser de solenoide o con motor eléctrico. También existen los de tipo electrohidráulicos.

Los actuadores con solenoide de movimiento lineal se utilizan ampliamente en pequeñas válvulas de globo de apertura y cierre de emergencia. Tiene limitaciones en la fuerza de empuje y en la carrera del eje.

Los actuadores motorizados tienen una caja de engranajes para transformar el movimiento circular y el par en movimiento lineal y empuje sobre el eje de la válvula. Estos son una buena elección por su gran versatilidad y fiabilidad.

Una de sus principales ventajas es que pueden estar equipados con un limitador de par que controlará el esfuerzo durante la carrera del eje y en el momento del asiento, ahorrando a las válvulas el desgaste por sobre esfuerzos y redundando en el control de fugas que en muchos casos son una limitación en los criterios de aceptación en fabricación y en las pruebas operacionales, definidos en las normas aplicables.

Los actuadores motorizados pueden utilizarse en válvulas de compuerta, globo y de mariposa en un amplio rango de medidas de válvula.

La experiencia ha demostrado que estos actuadores son robustos y fiables, siendo su principal ventaja la posibilidad de bloqueo en cualquier posición, lo cual es importante ya que en condiciones dinámicas de flujo se pueden producir variaciones en el par que inciden sobre los obturadores de las válvulas. Con la utilización de los motores de inducción la velocidad de cierre es casi constante.

Finalmente, en lo que respecta a funciones de seguridad, puede garantizarse la actuación con los sistemas eléctricos de emergencia y alimentando incluso los actuadores desde las baterías de salvaguardia.

Tal como se ha expuesto en capítulos anteriores, la diagnosis de válvulas como estrategia CBM nos garantizará no sólo el estado del conjunto válvula-actuador, controlando las desventajas e imprecisiones de cada sistema de actuación, sino también el momento adecuado para programar la intervención de mantenimiento.

3.2. Tipos de actuadores y válvulas en los buques

A bordo de los buques se pueden encontrar los mismos tipos de válvulas que en las centrales de generación eléctrica para idénticas funciones, ya sea de control de caudal o presión, dentro de sus respectivos sistemas. Dichos sistemas en los buques tanque tipo LNG³⁹ son muy similares a los de una central térmica. En otros tipos de buque también hay grandes similitudes en los sistemas de las máquinas dado que tienen las mismas funciones que en una central, ya sea para la generación de vapor, para las turbinas principales de generación eléctrica, para turbinas de propulsión, para los sistemas de generación auxiliares o de emergencia.

En definitiva, tanto en los buques como en las centrales de generación eléctrica, convencionales o nucleares, se encontrarán válvulas de globo, compuerta y de mariposa del mismo tipo, aunque no necesariamente del mismo fabricante. Dichas válvulas, cuando son actuadas pueden tener actuadores eléctricos, neumáticos e hidráulicos, tal como se ha expuesto en el apartado anterior.

Cuando se hace mención a las MOV, válvulas operadas por motor eléctrico, cabe esperar que los actuadores eléctricos estén operando válvulas de los tipos mencionados ya sean de globo, compuerta o mariposa. Sin embargo, los distintos criterios de diseño de los sistemas del buque o la planta pueden condicionar el tipo de actuador para las válvulas que deben, en definitiva, cumplir con la misma misión. Es decir, como se verá más adelante, se pueden encontrar las mismas válvulas de sistemas con la misma función con actuadores distintos en buques tanque LNG del mismo tipo.

En cualquier caso lo definitivo para este trabajo es que las válvulas actuadas eléctricamente o MOV pueden ser objeto de diagnóstico ya sea en una central térmica o en un buque.

³⁹ LNG: Liquefied Natural Gas

3.3. Características del buque

Inicialmente, el análisis de los sistemas del buque se limitaba a buques del tipo metanero LNG con turbina de vapor como máquina principal por su gran similitud a una central térmica de generación eléctrica. Finalmente, se ha considerado interesante analizar y comparar los sistemas equipados con válvulas motorizadas entre un buque metanero y un buque RO-RO⁴⁰ con máquina principal diésel.

3.3.1. Características principales de los buques analizados

Los tres buques estudiados representan una muestra suficiente para el objetivo de esta tesis, en tanto en cuanto que lo que se persigue, entre otros objetivos, es determinar que en este tipo de buques podemos encontrar válvulas motorizadas similares a las instaladas en centrales térmicas y nucleares y que aquellas pueden ser objeto de aplicación de la tecnología de diagnóstico de válvulas.

En la Tabla 4, se han incluido dos buques tanque tipo LNG por ser los más similares a una central de generación eléctrica, tanto en los sistemas principales y auxiliares para la generación del vapor que impulsará la turbina de vapor, como respecto al tipo de válvulas, ya sean de tipo globo, compuerta o mariposa, actuadas por actuador eléctrico, electrohidráulico o neumático.

A su vez, se ha incluido un buque RO-RO que equipa sistemas principales distintos por la naturaleza de los sistemas de carga y el tipo de máquina principal, que en este caso son motores diésel. Algunos de los sistemas auxiliares, sin embargo, pueden ser similares a los buques LNG.

⁴⁰ RO-RO: Roll-on/Roll-off

Tabla 4 : Características principales de los buques

Características principales de los Buques										
Nombre del Buque	Distintivo Llamada	Numero IMO	Capacidad carga	Registro Bruto TM	Eslora máxima(m)	Manga máxima(m)	Calado diseño (m)	Calado Aereo Normal (m)	Tipo Maquina Principal	Fabricante Máquina principal
Catalunya Spirit	EBZV	9236420	138,119 m3	90836	284,3	42,5	11,4	47,95	Turbina Vapor	Turbina Kawasaki 28000KW
Hispania Spirit	EBZZ	9230048	140,626 m3	94822	279,8	43,4	11,4	50,53	Turbina Vapor	Turbina Kawasaki 36000SHP
JM Entrecanales	EDBX	9398527	210 Plataformas	30926	209,4	26,5	7	34,2	Motor Diesel	Dos líneas con dos motores diesel Wärsilä 58752 CV

Fuente 10 : A. Varela

3.3.2. Diferencias fundamentales entre los buques analizados

En la tabla anterior se pueden ver las características principales de los buques, y en la siguiente Tabla 5, se pretenden resaltar las diferencias fundamentales, ya que estas justifican en parte los distintos actuadores de las válvulas encontradas en sus sistemas.

En esta última tabla se puede observar que entre los dos buques tanque del tipo LNG, aun siendo del mismo armador, están contruidos en distintos astilleros lo cual puede justificar que, en algunos casos, en los mismos sistemas del buque podamos encontrar actuadores diferentes para válvulas con la misma función.

Entre el buque RO-RO y los LNG se pueden identificar las mayores diferencias, respecto de las válvulas actuadas, en los sistemas de carga por la propia naturaleza de esta.

Respecto a los sistemas de la máquina, las diferencias sobre las válvulas actuadas están condicionadas al tipo de máquina principal de propulsión. En el RO-RO la máquina de propulsión son motores diésel y en los LNG su máquina de propulsión es una turbina de vapor que requiere una caldera de vapor cuyo combustible es fundamentalmente el gas que se vaporiza (Boil Off) en los tanques de carga.

Tabla 5: Diferencias de los buques analizados

Tipos de buques analizados							
Nombre del Buque	Tipo	Armador	Sociedad de clasificación	Bandera	Puerto de registro	Astillero	Máquina principal
Catalunya Spirit	LNG	Teekay	Lloyd's Register	Española	Sta Cruz de Tenerife	Izar Sestao	Turbina Kawasaki 28000KW
Hispania Spirit	LNG	Teekay	Bureau Veritas	Española	Sta Cruz de Tenerife	Daewoo (Corea del Sur)	Turbina Kawasaki 36000SHP
JM Entrecanales	RO RO	Acciona	Bureau Veritas	Española	Sta Cruz de Tenerife	Navantia	Dos líneas con dos motores diesel Wärsilä 58752 CV

Fuente 11 : A. Varela

3.3.3. Imagen de los buques estudiados

Los dos buques tanque del tipo LNG tienen características similares y, sin embargo, el buque JM. Entrecanales es muy distinto ya que es del tipo RO-RO. Puede observarse la diferencia evidente entre los buques tanque tipo LNG con gran obra muerta y con la parte superior de los tanques de carga sobresaliendo de la cubierta principal y con puente a popa mientras que el buque RO-RO, dispone de puente en proa y menor obra muerta. Evidentemente las diferencias fundamentales están en los sistemas de carga y su tipo de máquina de propulsión principal. Sin embargo, son los tres buques de última tecnología y válidos para esta investigación.

Figure 13 : Buque LNG. Catalunya Spirit



Fuente 12: Teekay Shiping

Figure 14 : Buque LNG Hispania Spirit



Fuente 13 : Teekay Shipping

Figure 15: Buque JM. Entrecanales



Fuente 14: Acciona

3.4. Análisis de los sistemas del buque

En este apartado se realiza la investigación e identificación de las válvulas motorizadas en los distintos sistemas del buque. Sobre los buques Catalunya Spirit e Hispania Spirit se han analizado los sistemas de carga y los sistemas de la máquina separadamente.

Se ha podido determinar, por lo tanto, que en los sistemas de carga⁴¹ [47] no se han encontrado válvulas actuadas por motor eléctrico. La mayoría de las válvulas actuadas en los sistemas de carga son neumáticas o hidráulicas.

Por otro lado, en el análisis realizado en los sistemas de la máquina⁴² [48] se han identificado las válvulas con actuador motorizado o electro-hidráulico que son las que forman parte de la tesis doctoral, pero igualmente se podrían identificar las válvulas neumáticas para un estudio futuro como ampliación de esta investigación.

Finalmente, en el buque JM Entrecanales se han estudiado todos los sistemas del buque sin diferenciarlos ya que al ser un buque de carga rodada no está dotado de sistemas complejos de carga y descarga de fluidos. Sus válvulas actuadas eléctrica, electro-hidráulica o neumáticamente, son en su mayoría sistemas de la máquina o sistemas auxiliares.

3.4.1. Buque LNG Catalunya Spirit

En este apartado se analizan todas las válvulas actuadas del buque Catalunya Spirit, ya sean de los sistemas de carga o de los sistemas de la máquina, con el objetivo de identificar el tipo de actuador, el sistema en el que están instaladas, su nº de referencia, el documento de diseño del buque donde se encuentran y la sección correspondiente.

En la Tabla 6, las válvulas identificadas aparecen como M si tienen actuador con motor eléctrico y las identificadas como E pueden tener actuador electrohidráulico o con solenoide.

⁴¹ Manual de los sistemas de carga: Cargo book

⁴² :Manual de los sistemas de la máquina: Machinery book

Cabe resaltar que en los sistemas de carga del buque especificados en el cargo book [47] no se han encontrado válvulas actuadas por motor eléctrico, la mayoría de las válvulas actuadas en los sistemas de carga son neumáticas o hidráulicas. Dichas válvulas no aparecen en la tabla por no ser objeto de este estudio. Por otro lado, en los sistemas de la máquina se han identificado las válvulas actuadas eléctricamente de cada uno de los sistemas que se especifican en el machinery book [48]

Tabla 6 : Clasificación válvulas Catalunya Spirit

Clasificación de válvulas actuadas en el buque LNG Catalunya Spirit						
Reference	No. of Valve/line	Type of valve	System	Document	Section	Page
1	SS03	E	Main & Desuperheated Steam	Machinery Book	2.1.1	1 of 2
2	SS04	E	Main & Desuperheated Steam	Machinery Book	2.1.1	1 of 2
3	BS28	E	Steam System	Machinery Book	2.1.3	1 of 2
4	BF2020	E	Boiler Feed Water	Machinery Book	2.2.2	1 of 10
5	BF0121	E	Boiler Feed Water	Machinery Book	2.2.2	1 of 10
6	To Main condenser	M	Fresh Water Generating	Machinery Book	2.3.3	1 of 2
7	To Atms.drain tank	M	Fresh Water Generating	Machinery Book	2.3.3	1 of 2
8	To Atms.drain tank	M	Fresh Water Generating	Machinery Book	2.3.3	1 of 2
9	To Clean drain tank	M	Fresh Water Generating	Machinery Book	2.3.3	1 of 2
10	Incinerator	M	Incinerator fuel oil	Machinery Book	2.6.4	1 of 2
11	Ejector condenser	M	Fresh water generating	Machinery Book	2.14.1	1 of 10
12	Ejector condenser	M	Fresh water generating	Machinery Book	2.14.1	1 of 10
13	Condensate cooled	M	Fresh water generating	Machinery Book	2.14.1	1 of 10
14	Feed water heater	M	Fresh water generating	Machinery Book	2.14.1	1 of 10
15	Turbine generator	E	Excess Steam Dump Control	Machinery Book	3.3.5	1 of 3
16	Turbine generator	E	Excess Steam Dump Control	Machinery Book	3.3.5	1 of 3

Fuente 15 : A.Varela

3.4.2. Buque LNG Hispania Spirit

En este apartado se analizan todas las válvulas actuadas del buque Hispania Spirit, ya sean de los sistemas de carga o de los sistemas de la máquina, con el objetivo de identificar el tipo de actuador, el sistema en el que están instaladas, su nº de referencia y el documento de diseño del buque donde se encuentran y la sección correspondiente. En la Tabla 7, las válvulas identificadas aparecen como M si tienen actuador con motor eléctrico y las identificadas como P pueden tener actuador neumático.

En este caso, en los sistemas de carga del correspondiente Cargo book del buque [49], no se han encontrado válvulas actuadas por motor eléctrico. La mayoría de las válvulas actuadas en los sistemas de carga son neumáticas o hidráulicas. Por lo tanto, no aparecen en la tabla por no ser objeto de estudio.

Por otro lado, en los sistemas de la máquina se han identificado las válvulas actuadas eléctricamente de cada uno de los sistemas que se especifican en el Machinery book [50].

Tabla 7 : Clasificación válvulas Hispania Spirit

Clasificación de válvulas actuadas en el buque LNG Hispania Spirit							
Reference	No. of Valve/line	Type of valve	System	Document	Section	Page	Observation
1	To Atms.drain tank	M	Fresh Water Generating	Machinery Book	Ilus 6.6.2i	82	
2	Vacum condenser	M	Fresh Water Generating	Machinery Book	Ilus 6.6.2i	82	
3	ES122	P	Desuperheated Steam	Machinery Book	Ilus 7.1.2i	88	Pneumatic
4	SB002	P	Desuperheated Steam	Machinery Book	Ilus 7.1.2i	88	Pneumatic
5	ES081	P	Desuperheated Steam	Machinery Book	Ilus 7.1.2i	88	Pneumatic
6	331B Port	P	Desuperheated Steam	Machinery Book	Ilus 7.1.2i	88	Pneumatic
7	331B STBD	P	Desuperheated Steam	Machinery Book	Ilus 7.1.2i	88	Pneumatic
8	ES191	M	Generator Steam	Machinery Book	Ilus 7.1.3.1i	90	Butterfly
9	ES196	M	Generator Steam	Machinery Book	Ilus 7.1.3.1i	90	Butterfly
10	Astern Guard v/v	M	Gland Steam and Leak of	Machinery Book	Ilu 7.1.6i	96	
11	To Main Condenser and Drain Tank	M	Bleed and Fresh water generator	Machinery Book	Ilu 7.1.7i	97	
12	CD020	M	Main Condensate	Machinery Book	Ilu 7.2.1i	99	
13	CD040	M	Main Condensate	Machinery Book	Ilu 7.2.1i	99	
14	20B port	M	Boiler Feed Water	Machinery Book	ilu7.2.3i	104	
15	20B stbd	M	Boiler Feed Water	Machinery Book	ilu7.2.3i	104	
16	FD037	M	Boiler Feed Water	Machinery Book	ilu7.2.3i	104	
17	Three way control valve	M	Fresh water cooling	Machinery Book	ilu7.4i	115	
18	AV1 to AV11 valves	M	Foam fire extinguishing	Machinery Book	ilu12.1.6i	314	
19	CW018	M	Main sea water circulating	Machinery Book	ilu7.3.1i	109	Butterfly
20	CW027	M	Main sea water circulating	Machinery Book	ilu7.3.1i	109	Butterfly
21	CW028	M	Main sea water circulating	Machinery Book	ilu7.3.1i	109	Butterfly
22	CW06	M	Main sea water circulating	Machinery Book	ilu7.3.1i	109	Butterfly
23	CW010	M	Main sea water circulating	Machinery Book	ilu7.3.1i	109	Butterfly
24	CW014	M	Main sea water circulating	Machinery Book	ilu7.3.1i	109	Butterfly
25	CW025	M	Main sea water circulating	Machinery Book	ilu7.3.1i	109	Butterfly
26	CW026	M	Main sea water circulating	Machinery Book	ilu7.3.1i	109	

Fuente 16: A.Varela

3.4.3. Buque RO-RO J.M. Entrecanales

En este buque se ha realizado el análisis de todos los sistemas del buque sin diferenciar los sistemas de carga de los sistemas de la máquina.[51]. En este tipo de buques RO-RO, los sistemas de carga son plataformas y elevadores y algún tipo de grúa o pescante que en ningún caso tienen la complejidad de los sistemas de carga de los buques tanque y en consecuencia no están dotados de toda la diversidad de válvulas actuadas que se pueden encontrar en los mismos.

Tal como se muestra en la Tabla 8 las válvulas identificadas como M son motorizadas y las identificadas como E son electrohidráulicas, ambos tipos son los que interesan en este estudio. En dicha tabla se especifica el tipo de actuador Motorizado o E (electrohidráulico), el sistema en el que están instaladas, su nº de referencia y el documento de diseño del buque donde se encuentran.

Tabla 8 : Clasificación válvulas RO-RO

Clasificación de válvulas actuadas en el buque RO-RO (Page 1 of 3)					
Reference	No. of Valve/line	Type of valve	System	Document	Observation
1	2561-119 (Toma mar baja)	Motorizada	Cooling sea water	256.2.02.001	
2	2561-167 (Toma mar proa)	Motorizada	Cooling sea water	256.2.02.002	
3	2561-176 (Toma mar baja)	Motorizada	Cooling sea water	256.2.02.003	
4	2561-42 (Toma mar alta)	Motorizada	Cooling sea water	256.2.02.004	
5	2612-61 (Transfer pump suction)	E	Boiler fuel system	342.2.02.002	electrohydraulic
6	2612-106 (Trasiego combustible)	E	Emergency and harbour Diesel oil	342.2.02.003	electrohydraulic
7	2561-201 (HVAC)	Motorizada	HVAC	514.6.02.001	
8	2561-202 (HVAC)	Motorizada	HVAC	514.6.02.001	
9	5291-4 (BW 2P)	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
10	5291-1 (BW 2P)	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
11	5291-5 (BW 2S)	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
12	5291-8 (BW 2S)	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
13	5291-9	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
14	5291-15	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
15	5291-12	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
16	5291-17	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
17	5291-18	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
18	5291-19	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
19	5291-23	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
20	5291-24	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
21	5291-25	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
22	5291-26	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
23	5291-30	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
24	5291-31	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic

Clasificación de válvulas actuadas en el buque RO-RO (Page 2 of 3)					
Reference	No. of Valve/line	Type of valve	System	Document	Observation
25	5291-34	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
26	5291-36	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
27	5291-37	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
28	5291-38	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
29	5291-40	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
30	5291-41	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
31	5291-43	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
32	5291-45	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
33	5291-47	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
34	5291-48	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
35	5291-51	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
36	5291-52	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
37	5291-54	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
38	5291-56	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
39	5291-57	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
40	5291-58	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
41	5291-59	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
42	5291-63	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
43	5291-64	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
44	5291-67	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
45	5291-68	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
46	5291-70	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
47	5291-71	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
48	5291-75	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
49	5291-76	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
50	5291-78	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
51	5291-79	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
52	5291-83	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
53	5291-84	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
54	5291-86	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
55	5291-87	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
56	5291-91	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
57	5291-92	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
58	5291-94	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
59	5291-95	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
60	5291-99	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic

Clasificación de válvulas actuadas en el buque RO-RO (Page 3 of 3)					
Reference	No. of Valve/line	Type of valve	System	Document	Observation
61	5291-100	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
62	5291-101	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
63	5291-104	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
64	5291-107	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
65	5291-108	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
66	5291-109	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
67	5291-116	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
68	5291-117	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
69	5291-118	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
70	5291-119	E	Trim and ballast	529.5.02.001	electrohydraulic
71	5932-176	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
72	5932-179	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
73	5932-258	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
74	5932-243	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
75	5932-259	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
76	5932-93	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
77	5932-85	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
78	5932-88	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
79	5932-57	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
80	5932-99	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
81	5932-75	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
82	5932-91	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
83	5932-108	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
84	5932-103	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
85	5932-104	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
86	5932-111	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
87	5932-241	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
88	5932-82	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
89	5932-259	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic
90	5932-258	E	Bilge (Sentinas)	593.2.02.002	Butterfly electrohydraulic

Fuente 17 : A.Varela

3.4.4. Resumen de válvulas actuadas por tipo de buque

Se puede observar que en el buque tipo RO-RO se utilizan mayormente válvulas con actuador electrohidráulico y muchas menos con actuador motorizado.

En los buques tipo LNG, que se construyeron en distintos astilleros, encontramos algunos sistemas que equipan válvulas con las mismas funciones aunque tienen actuadores motorizados en uno de ellos y en el otro electrohidráulicos. En la Tabla 9, se pueden observar las válvulas que se han montado en los mismos sistemas con el mismo tipo de válvula pero equipadas con diferente tipo de actuador. En cualquier caso pueden ser objeto de diagnosis.

Tabla 9 : Válvulas en buques LNG actuadas con distinto actuador

Válvulas actuadas en los buques LNG con distinto actuador				
Ship	Number of valves	Sub-system	Type of valve	System
LNG	5	Desuperheated Steam	Pneumatic	Desuperheated Steam
Hispania	2	Generator Steam	Motorized	Generator Steam
Spirit			(Butterfly)	
	3	Boiler Feed Water	Motorized	Boiler Feed Water
LNG	2	Main & Desuperheated Steam	Electrohydraulic	Main & Desuperheated Steam
Catalunya	1	Steam System	Electrohydraulic	Steam System
Spirit	2	Boiler Feed Water	Electrohydraulic	Boiler Feed Water

Fuente 18 : A. Varela

En el resumen por tipo de buque Tabla 10, todas las válvulas ya sean motorizadas o electrohidráulicas pueden ser objeto de un mantenimiento predictivo o CBM utilizando la tecnología de diagnosis de válvulas. Si bien para válvulas de diámetro inferior a una pulgada y actuador Electro-hidráulico convendría hacer un estudio detallado de aplicación. En dicha tabla se han especificado tanto el sistema al que pertenecen como el sub-sistema.

Tabla 10 : Comparativa entre válvulas actuadas por buque

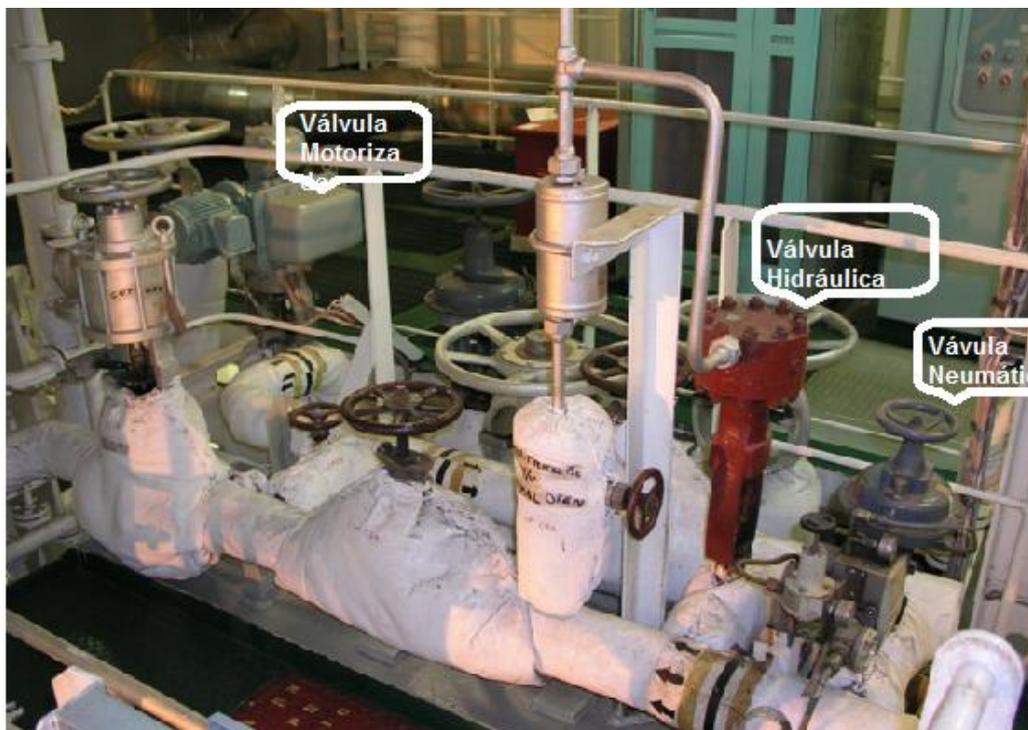
Comparativa entre válvulas actuadas en el buque				
Ship	Number of valves	Sub-system	Type of valve	System
RO - RO	4	Cooling sea water	Motorized	Cooling sea water
	2	HVAC	Motorized	HVAC
	1	Transfer pump suction	Electrohydraulic	Boiler fuel system
	1	Trasiego combustible	Electrohydraulic	Emergency and harbour Diesel oil
	62	Trim & Ballast	Electrohydraulic	Trim & Ballast
	20	Bilge System	Electrohydraulic Butterfly	Bilge (Sentinas)
LNG Hispania Spirit	1	To Atms.drain tank	Motorized	Fresh Water Generating
	1	Vacum condenser	Motorized	Fresh Water Generating
	5	Desuperheated Steam	Pneumatic	Desuperheated Steam
	2	Generator Steam	Motorized Butterfly	Generator Steam
	1	Astern Guard v/v	Motorized	Gland Steam and Leak of
	1	To Main Condenser and Drain Tank	Motorized	Bleed and Fresh water generator
	2	Main Condensate	Motorized	Main Condensate
	3	Boiler Feed Water	Motorized	Boiler Feed Water
	1	Three way control valve	Motorized	Fresh water cooling
	1	Foam fire extinguishing	Motorized	Foam fire extinguishing
	7	Main sea water circulating	Motorized Butterfly	Main sea water circulating
	1	Main sea water circulating	Motorized	Main sea water circulating
LNG Catalunya Spirit	2	Main & Desuperheated Steam	Electrohydraulic	Main & Desuperheated Steam
	1	Steam System	Electrohydraulic	Steam System
	2	Boiler Feed Water	Electrohydraulic	Boiler Feed Water
	1	To Main condenser	Motorized	Fresh Water Generating
	2	To Atms.drain tank	Motorized	Fresh Water Generating
	1	To Clean drain tank	Motorized	Fresh Water Generating
	1	Incinerator	Motorized	Incinerator fuel oil
	2	Ejector condenser	Motorized	Fresh water generating
	1	Ejector condenser	Motorized	Fresh water generating
	1	Condensate cooled	Motorized	Fresh water generating
	1	Feed water heater	Motorized	Fresh water generating
	2	Turbine generator	Electrohydraulic	Excess Steam Dump Control

Fuente 19: A. Varela

3.5. Imágenes de los distintos tipos de válvulas instaladas en los buques

En la imagen Figure 16, obtenida a bordo del buque Catalunya Spirit, podemos observar distintos tipos de válvulas instaladas en los sistemas de la sala de máquinas. Esta imagen constata la evidencia de que en los buques analizados se utilizan válvulas de los tipos estudiados en este trabajo. La tecnología de diagnóstico puede utilizarse, como ya se ha visto en capítulos anteriores, en válvulas motorizadas y neumáticas, ya sean de globo, compuerta o mariposa, lo cual no siempre es fácil de identificar en líneas aisladas.

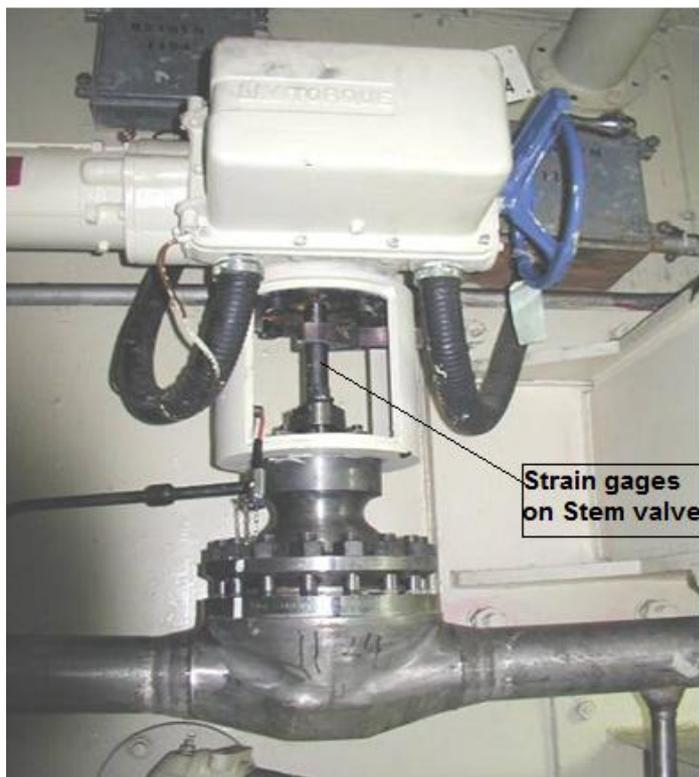
Figure 16 : Identificación válvulas a bordo LNG Catalunya Spirit



Fuente 20 : A. Varela

La válvula que aparece en Figure 17 pertenece a una central nuclear y es del mismo tipo de las que pueden encontrarse en los buques. Es una válvula de compuerta o globo actuada por un motor eléctrico Limitorque, marca que podemos apreciar en la caja conexiones frontales e igualmente identificamos el motor a la izquierda de la imagen y el volante de accionamiento de emergencia manual a la derecha en color azul.

Figure 17: Posición montaje galgas extensiométricas en eje



Fuente 21: Elaboración propia.

Así mismo, en la Figure 18, se aprecia una MOV con válvula de mariposa y una válvula AOV⁴³ con actuador neumático en la Figure 19.

Figure 18: Válvula mariposa motorizada. Hispania Spirit



Fuente 22 : A. Varela

Figure 19 : Válvula neumática. Hispania Spirit



Fuente 23: A. Varela

⁴³ AOV: Air Opered Valve

En la Figure 20, se aprecia únicamente el actuador motorizado de una válvula de mariposa con caja de conexiones sobre la caja de engranajes que en este tipo tiene indicador de posición, volante manual y motor en lado opuesto al mismo.

Figure 20 : Actuador eléctrico de válvula mariposa Catalunya Spirit



Fuente 24 : A. Varela

En la Figure 21, se observa conjunto de válvula de mariposa con actuador motorizado y volante manual al frente de la imagen.

Figure 21 : Válvula mariposa con actuador eléctrico Hispania Spirit



Fuente 25: A. Varela

3.6. Similitud entre válvulas actuadas en centrales de energía y en los buques

En este apartado, además de identificar y analizar los tipos de válvulas actuadas que se montan en los distintos sistemas de los buques, se ha puesto en evidencia que los tipos de válvulas motorizadas son idénticas conceptualmente a las utilizadas en la industria nuclear o en las térmicas convencionales.

Las válvulas motorizadas utilizadas en una u otra industria pueden ser de fabricantes distintos, tanto las válvulas como sus actuadores, pero los principios físicos de funcionamiento y las magnitudes que se miden para la diagnosis son las mismas.

Por otra parte, es lógico pensar que en función de los requisitos de diseño, los materiales utilizados en los componentes de las válvulas pueden ser distintos, es decir, una válvula del mismo tipo, sea globo, compuerta o mariposa, se fabricará en aceros al carbono con distintas calidades o aleaciones, o en aceros inoxidable, o en cualquier otro tipo de material, dependiendo del uso al que se destine la válvula.

En definitiva, todas las válvulas actuadas por motor eléctrico necesitan conectar su vástago de empuje al eje del actuador que finalmente realiza la conversión del movimiento lineal, tracción o empuje, a través de su caja de engranajes accionada por el motor eléctrico. Ver Figure 9, del apartado Métodos de diagnosis También se puede ver con todo detalle en el anexo A.1. Descripción y Comprobaciones en una MOV.

En consecuencia, lo más importante es que cualquier válvula de compuerta, globo o mariposa, sea de un buque o una planta de generación eléctrica, y que necesite actuarse a distancia por un actuador eléctrico, tendrá un vástago o eje y una caja de conexiones donde se pueden montar las galgas extensiométricas sobre el eje, por un lado, y conectar un amperímetro en las bornas de conexiones por el otro, y con ello realizar las medidas necesarias para la diagnosis.

3.7. Justificación de la diagnosis de válvulas motorizadas en los buques

Las válvulas motorizadas instaladas en las centrales de generación eléctrica y en los buques, en su gran mayoría, son componentes cuya misión principal es permitir el paso total o aislar un fluido de proceso por operación automática o manualmente desde sala de control mediante la actuación de un operador.

Por ello, habitualmente estas válvulas tienen un modo de operación abierta o cerrada, apenas se actúan en condiciones normales de operación de la planta. Es en condiciones de operación de emergencia cuando se requiere que su funcionamiento sea correcto.

Por esta razón, la disponibilidad operacional de una válvula motorizada es sumamente importante, y debe asegurarse un funcionamiento correcto de apertura y cierre, con objeto de evitar incidentes relacionados con la seguridad o la producción de la planta.

3.7.1. Las incertidumbres del mantenimiento preventivo

El conseguir prever o asegurar que una válvula motorizada vaya a actuar correctamente cuando se requiera, por condiciones de operación o proceso, está relacionado directamente con la definición y ejecución de las actividades de mantenimiento preventivo encaminadas a la obtención de una disponibilidad operacional satisfactoria.

3.7.1.1. Las incertidumbres sobre los ajustes de los interruptores de carrera y par

La puesta en servicio de una válvula motorizada, bien como situación inicial (puesta en marcha tras parada de la planta) o bien después de haber realizado sobre ella una operación de desmontaje o montaje (mantenimiento), requiere un proceso sumamente importante que es el ajuste de los interruptores de control (interruptores carrera y par), para que su forma de actuación sea consecuente con las condiciones de proceso en las que va a operar. Ver A.1.6. Ajustes de los interruptores de par

El ajuste de dichos interruptores supone una cierta incertidumbre debido a que con los medios habituales utilizados hasta la fecha no se puede asegurar, y comprobar posteriormente por medición, que dicho ajuste sea el adecuado.

Por una parte el interruptor de par, que teóricamente viene ajustado en el conjunto válvula-actuador en la prueba inicial en banco del fabricante del actuador, se debería re-tarar ya que las condiciones de operación de la válvula varían a lo largo del tiempo (rozamiento, empaquetadura, lubricación, etc.).

Si a ello se añaden las variaciones producidas por las tolerancias propias en las piezas del actuador (unidad limitadora de par, sinfín-paquete de arandelas, etc.) al realizar desmontajes y montajes, es necesario una comprobación del ajuste del interruptor de par para que asegure que está en un valor tal que la válvula operará correctamente en los límites que se han establecido por cálculo con anterioridad. Por supuesto que ello debe hacerse si en la operación de mantenimiento están involucradas partes del actuador que tengan influencia en el ajuste del interruptor. En caso contrario, no será necesario.

Por otra parte, el ajuste del interruptor de carrera, que a primera vista parece un ajuste fácil, se complica si la válvula a regular es de velocidad muy alta (gran inercia). Ello es debido a que las variaciones en el ajuste del interruptor y, por tanto, en la carrera de la válvula, implican una variación de esfuerzo en los límites de desconexión del interruptor.

En otras palabras, podemos decir que asegurar que el interruptor de carrera desconecte antes del contacto mecánico, no asegura cual va a ser el esfuerzo final en dicho contacto, siempre que la válvula sea de velocidad alta.

De las consideraciones realizadas en cuanto a ajuste de los interruptores de control de la válvula y de las condiciones variables en las que opera, surge la necesidad de poder medir y comprobar dichos ajustes para que la funcionalidad de la válvula sea correcta.

3.7.1.2. Incertidumbres sobre las tareas de frecuencias fijas de preventivo

Adoptar como estrategia el mantenimiento preventivo basado en tareas definidas por tiempo de funcionamiento o número de actuaciones de la válvula genera otro tipo de incertidumbres sobre la disponibilidad operacional. Este planteamiento supone aceptar un comportamiento de los componentes frente al fallo, en un plazo fijo de tiempo, y a partir de este se planifican y ejecutan las actividades de mantenimiento conocidas habitualmente como gamas y/o procedimientos. Dichos procedimientos, los cuales detallan la metodología y las

técnicas, así como los repuestos necesarios, se definen como tareas o conjunto de tareas (protocolos) en el sistema de gestión de mantenimiento.

Por esta razón, definir el mantenimiento preventivo como estrategia para un ESC (en nuestro caso una MOV), resulta poco fiable, y se hace obvio el análisis individual de cada componente basándose en una estrategia CBM con una tecnología como la diagnosis. Además el mantenimiento preventivo tradicional tienen una serie de inconvenientes, tales como:

- Desmontajes innecesarios que implican costes elevados
- Sustitución de piezas (repuestos) con mayor período de vida posible.
- Indisponibilidades por mantenimiento.
- Mayores costes de mano de obra.

Éstos a su vez originan otros inconvenientes, difícilmente evaluables económicamente, como indisponibilidad del componente por error humano, etc.

3.7.2. La diagnosis de válvulas como solución a las incertidumbres del mantenimiento preventivo

Los inconvenientes y costes que plantea realizar un mantenimiento según los criterios anteriores (preventivo y correctivo), obliga a pensar en otro sistema que mejore sensiblemente en sistematización y coste para que la válvula motorizada tenga la fiabilidad adecuada para las exigencias de disponibilidad operacional. [19]

Si una válvula motorizada se va a comportar en el tiempo de forma diferenciada porque opera en condiciones distintas (presión, temperatura, etc.) a otras de iguales características, será más conveniente analizar individualmente cada válvula. Para ello, se utiliza el mantenimiento predictivo o CBM. Además, el concepto de diagnosis de válvulas surge de la necesidad de analizar cada una de ellas por separado, debido a las condiciones particulares en las que opera.

La diagnosis consiste en la medición de una serie de parámetros de comportamiento de la válvula motorizada, y a través de éstos analizar su estado funcional. Dicho análisis permitirá establecer y planificar las actividades preventivas necesarias a realizar en la válvula para asegurar que su funcionamiento sea correcto cuando requiera operarse.

La realización de la diagnosis en una válvula motorizada requiere [15]:

- Elección de parámetros significativos que indiquen el estado funcional.
- Adquisición de datos para la medición de tales parámetros,
- Valoración de las medidas obtenidas o diagnóstico.
- Predicción, tendencia y definición del margen de seguridad.
- Definición de actividades de mantenimiento y monitorización de parámetros.

Por otro lado debe procurarse, como planteamiento global de la ejecución de la diagnosis, que los medios utilizados en ella cumplan una serie de características que permitan la facilidad de su ejecución (facilidad de instalación y medida, manejabilidad y transporte, facilidad de interpretación de las medidas obtenidas, etc.).

CAPÍTULO IV. Sistemas de diagnosis de válvulas propuestos durante el Ciclo de Vida del buque

El objetivo de este capítulo es en primer lugar, evaluar el impacto previsto con la aplicación del CBM en los buques y en segundo lugar, establecer una relación clara del ciclo de vida con la Ingeniería de mantenimiento para finalizar por la determinación de los tipos de diagnosis de válvulas más adecuados para cada fase del ciclo de vida, así como su idoneidad en el fin perseguido. Dicho fin se puede definir como el aumento de la seguridad y disponibilidad de la planta o buque a través de la fiabilidad de sus ESC.

4.1. Evaluación del impacto previsto con la aplicación de las estrategias de CBM

Basándonos en la propia doctrina de la estrategia de mantenimiento CBM y en el retorno de experiencia de las centrales nucleares, se puede afirmar que el impacto previsto con la utilización de la tecnología de diagnosis de válvulas será muy similar al obtenido en la industria nuclear[52].

Además, se pueden extrapolar los objetivos alcanzados con la diagnosis de válvulas en las centrales nucleares[45] una vez que se ha puesto en evidencia que los tipos de válvulas motorizadas que se instalan en los buques son idénticas conceptualmente a las utilizadas en la industria nuclear. Las válvulas motorizadas utilizadas en una y otra industria pueden ser de fabricantes distintos pero los principios físicos de funcionamiento y las magnitudes que se miden para la diagnosis son las mismas.

Por consiguiente, se puede afirmar que la tecnología de diagnosis de válvulas como herramienta de la estrategia de Mantenimiento basado en la condición (CBM) hará posible las siguientes mejoras:

- Incrementará la eficiencia de las válvulas y la productividad de los sistemas
- Minimizará los fallos de las válvulas, luego aumentará la fiabilidad y seguridad de los sistemas y de la planta.
- Con el estudio de tendencias y el control del margen de seguridad de las válvulas, se podrán planificar las paradas de los sistemas y se optimizaran las intervenciones de mantenimiento.

- Mejorará la planificación de tareas en astillero en los reconocimientos periódicos.
- Al disminuir la intervención de las tareas más intrusivas se reducirán los fallos humanos por mantenimiento.
- Disminuirá el inventario de repuestos.
- Disminuirán los costes laborales.

4.2. Relación entre el Ciclo de Vida y la Ingeniería de Mantenimiento

El concepto de mantenimiento tradicional y los contratos u ofertas de servicios de mantenimiento han ido evolucionando con las nuevas tecnologías y metodologías de trabajo.

Inicialmente la ingeniería de una planta comenzaba diseñando los sistemas y sus criterios de funcionamiento y continuaba con la ingeniería de desarrollo o de detalle y por otra parte, el mantenimiento empezaba su tarea con la puesta en marcha de la planta.

Actualmente el mantenimiento ha evolucionado hacia la Ingeniería de Mantenimiento la cual participa desde el diseño conceptual, para preparar las estrategias y técnicas de mantenimiento, hasta el final de su vida operativa.

Tanto las nuevas tecnologías de mantenimiento, como los ingenieros especialistas, han alcanzado un alto grado de sofisticación y preparación con la utilización de técnicas innovadoras, así como en el tratamiento y análisis de la información.

El objetivo fundamental de todo ello es anticiparse al fallo, es decir, tener la capacidad de controlar la tendencia de los parámetros funcionales de un ESC para asegurar la llamada *tasa de supervivencia o margen de seguridad*.

Actualmente, la industria de servicios de mantenimiento y las ingenierías especializadas en tecnologías de diagnóstico, han definido el concepto de apoyo al Ciclo de Vida de una planta o buque para ofrecer un servicio integral. Es decir, entendiendo el ciclo de vida desde la fase de diseño hasta el desmantelamiento de la planta o el buque.

4.3. Criterios de selección de las MOV que pueden ser objeto de diagnosis

Los criterios de selección de las MOV que pueden ser objeto de la estrategia CBM y en consecuencia de la tecnología de diagnosis de válvulas, se realizarán con la metodología definida previamente en los apartados 2.1.5 , 2.1.6 y 2.2.4

En consecuencia, la estrategia y los criterios de selección de las MOV que pueden ser objeto de diagnosis se deberán establecer siguiendo las siguientes premisas:

- 1) Establecer como estrategia corporativa de mantenimiento el CBM para superar las incertidumbres del mantenimiento preventivo clásico.
- 2) Realizar un análisis de los sistemas del buque con la metodología RCM.
- 3) Establecer una Base de Datos de parámetros físicos que incorpore para cada MOV los requisitos específicos, tanto de operación como ambientales, de los sistemas del buque analizado, según el apartado Mantenimiento centrado en la Fiabilidad, y que deberán respetar la normativa aplicable.
- 4) Establecer un programa de pruebas de diagnosis para las MOV según Objetivo del Performance Prediction Program (PPP) Analizar los resultados de la diagnosis, establecer un gráfico de control de tendencia definiendo los niveles crítico y límite de la curva del valor observable, para garantizar la Tasa de supervivencia entre paradas (revisiones reglamentarias en varadero) e incorporar esta información en una Base de Datos Histórica de pruebas.
- 5) Revisar el plan de mantenimiento de las MOV ajustando las tareas de mantenimiento preventivo, intrusivas (con desmontaje) y no intrusivas (sin desmontaje) a los resultados de las diagnosis y su curva de tendencia.
- 6) Procurar que los medios y la tecnología de diagnosis utilizados cumplan una serie de características que permitan la facilidad de su ejecución (facilidad de instalación y medida, manejabilidad y transporte, facilidad de interpretación de las medidas obtenidas, etc.)

4.4. Fallos potenciales y tipos de diagnosis para cada fase del Ciclo de Vida

En este apartado se analizan, por una parte, tanto los fallos potenciales que pueden aparecer en las MOV de los buques, como los sistemas de detección propuestos con la utilización de la tecnología de diagnosis más adecuada y por otra parte, se definen los tipos de diagnosis que pueden utilizarse a lo largo del ciclo de vida del buque como estrategia preventiva y de verificación.

4.4.1. Fallos potenciales en las MOV

Durante el estudio del accidente de TMI el EPRI determinó las diversas causas de los fallos encontrados en las MOV. Los más significativos fueron:

- Inadecuado dimensionamiento de la válvula y/o el actuador de las MOV. Lo cual se debió a defectos de fabricación o incoherencias con los criterios de diseño.
- Mayores esfuerzos requeridos en las válvulas a los esperados por causa de un mal diseño de los sistemas.
- Daños producidos en las válvulas durante la operación.
- Identificación de degradación en los componentes mecánicos y/ o eléctricos de las MOV.
- Mal dimensionamiento en los esfuerzos y en el par de las válvulas de mariposa siendo poco fiables en su respuesta.
- Fallos humanos durante las tareas de mantenimiento más intrusivo como las revisiones generales de actuador y válvula.

4.4.2. Tipos de diagnosis aplicables en las MOV de los buques

Para evitar los distintos fallos que pueden aparecer en las MOV de un buque se proponen los distintos tipos de diagnosis aplicables en la industria naval como ACV⁴⁴. Estas son las siguientes:

- Diagnosis “in situ” estáticas y dinámicas periódicas.
- Monitorización de diagnosis estáticas o dinámicas a distancia desde sala control de máquinas.
- Diagnosis desde CCM⁴⁵.
- Monitorización en continuo de diagnosis desde CCM
- Incorporación de sistemas de inteligencia artificial para el análisis de parámetros de diagnosis en MOV

4.4.3. Tabla de fallos posibles y Métodos de diagnosis propuestos para su detección

En la Tabla 11, se identifican los fallos potenciales y sus causas, estableciendo claramente los parámetros detectables y los métodos de diagnosis recomendados. En dicha tabla se pone de manifiesto que cualquier tipo de fallo puede ser detectado por sus parámetros eléctricos con la diagnosis desde CCM, aunque con este método no se pueda discriminar si el fallo es de la válvula o del actuador, lo cual si puede ser identificado por una diagnosis estática o dinámica.

⁴⁴ ACV: Apoyo Ciclo Vida

⁴⁵ CCM: Centro control de Motores

Tabla 11 : Tabla de fallos y métodos de detección

Tabla de fallos-causa y posible técnica diagnosis MOV				
Tipo de fallo	Causa posible	Parámetro detectable	Método de detección	Observaciones
Inadecuado dimensionamiento válvula o actuador	Defecto de diseño ingeniería conceptual o del fabricante	Pico de intensidad por aumento esfuerzos en el vástago	Diagnosis desde CCM y/o diagnosis in situ	La diagnosis desde CCM no discrimina fallo entre válvula y actuador
Esfuerzo o par superior al esperado	Defecto de diseño ingeniería conceptual o del fabricante	Pico de intensidad por aumento esfuerzos en el vástago	Diagnosis desde CCM y/o diagnosis in situ	La diagnosis desde CCM no discrimina fallo entre válvula y actuador
Daños producidos en la válvula durante la operación	Golpe de ariete o defecto de materiales	Pico de intensidad por aumento esfuerzos en el vástago	Diagnosis desde CCM y/o diagnosis in situ	La diagnosis desde CCM no discrimina fallo entre válvula y actuador
Degradación prematura componentes mecánicos o eléctricos	Defecto selección de materiales o causas ambientales y de sistema no previstas	Pico de intensidad por aumento esfuerzos en el vástago	Diagnosis desde CCM y/o diagnosis in situ	La diagnosis desde CCM no discrimina fallo entre válvula y actuador
Ajustes defectuosos por tareas mantenimiento	Fallos humanos durante tareas mantenimiento	Pico de intensidad por aumento esfuerzos en el vástago	Diagnosis desde CCM y/o diagnosis in situ	La diagnosis desde CCM no discrimina fallo entre válvula y actuador

Fuente 26: A. Varela

4.4.4. Métodos de diagnosis propuestos para cada fase del ciclo de vida

Los tipos de diagnosis aplicables a lo largo del ciclo de vida del buque se establecen en tres fases del ciclo:

- a) Control de fabricación.
Diagnosis, estática o dinámica, como control de calidad del conjunto actuador válvula, verificando que los parámetros eléctricos y mecánicos de par y de esfuerzo en el eje se corresponden con los esperados de diseño.
- b) Pruebas de componentes y sistemas durante la puesta en marcha inicial del buque.
Diagnosis estáticas y/o dinámicas en la fase de puesta en marcha de los sistemas en los buques, verificando que los parámetros eléctricos y mecánicos de par y de esfuerzo en el eje se corresponden con los esperados de diseño en condiciones dinámicas de los sistemas.
- c) Fase de explotación del buque.

Diagnosis en función de la clasificación de las MOV siguiendo los criterios de la metodología RCM.

Según los criterios de clasificación relacionados con la seguridad y la disponibilidad se proponen:

- Diagnósis desde CCM, periódica o monitorizada en función de la criticidad de la MOV para el sistema y el buque.
- Diagnósis in situ, estática o dinámica, con medición directa de par y esfuerzo a la vez que los parámetros eléctricos. Periódica o con monitorización en continuo desde sala control de máquinas.
- Estudio de tendencias y control del margen de seguridad con señales de alarma en puntos críticos de la curva.

4.5. Metodología para la implantación de la tecnología de diagnóstico en un buque

La tecnología de diagnóstico de válvulas se desarrolló a partir de 1989 con el objetivo de superar los problemas encontrados en las válvulas MOV aunque la mayoría de las plantas estaban en explotación. Esto supuso un reto para las empresas implicadas en esta tecnología por la complejidad que suponía la implantación en sí misma.

Sin embargo, se ha demostrado que esta tecnología se pudo poner en práctica en las plantas nucleares en explotación y además que las empresas de dicho sector industrial han continuado con el desarrollo de nuevas técnicas para incorporarlas desde la fase de diseño.

En los siguientes apartados se especifican la metodología para la implantación en un buque de nueva construcción y los inconvenientes que supone la implantación de dicha tecnología en un buque en explotación.

4.5.1. Metodología para la implantación en un buque de nueva construcción

Cuando con la política del armador del buque se adopte como estrategia corporativa la utilización del mantenimiento CBM de las válvulas MOV, se integrará la tecnología de diagnóstico desde el inicio del diseño del buque y de su construcción en el astillero.

Esta estrategia de mantenimiento con la diagnóstico como CBM, se utilizará en sus distintas fases del ciclo de vida, ya sea en la fase de construcción como en la de explotación, con las

ventajas que esto supone para su ejecución. Es decir, se evitarán los inconvenientes que se mencionan en el apartado 4.4

En consecuencia, para implantar la tecnología de diagnóstico se deben realizar los siguientes pasos:

- a) Análisis de sistemas con metodología RCM durante la fase de diseño del buque.
- b) Establecimiento de la Base de Datos físicos de las MOV
- c) Selección del sistema de diagnóstico más adecuado para cada MOV, ya sea desde CCM o con monitorización en continuo.
- d) Instalación por el fabricante de las galgas extensiométricas en los vástagos de las válvulas o utilización del SmartStem. [40]
- e) Diseño e instalación del cableado eléctrico hasta el punto de toma de conexión del equipo de adquisición de datos y de análisis.
- f) Verificación funcional y comprobación de la Tasa de supervivencia de las MOV como control de calidad del conjunto actuador-válvula.
- g) Diagnóstico dinámico en fase de puesta en marcha de los sistemas del buque.
- h) Establecimiento de la Base de datos para el análisis de las diagnósticos con la primera referencia de puesta en marcha de los sistemas.
- i) Programación de las frecuencias de diagnóstico en el tiempo operacional en función de la Tasa de supervivencia inicial.
- j) Definición y planificación de las tareas preventivas (con frecuencia fija) del Plan de mantenimiento de las MOV en función de los resultados de la diagnóstico.

4.5.2. Inconvenientes que pueden presentarse durante la implantación en un buque en explotación

Si durante la fase de diseño de la planta no se contempló la diagnóstico de válvulas, es evidente que no se integraron los sensores o galgas extensiométricas en los vástagos de las válvulas, ni se instaló el cableado eléctrico hasta el punto de instalación del equipo de diagnóstico o hasta el CCM.

En consecuencia, pueden presentarse toda una serie de inconvenientes como:

- a) Detección tardía de los problemas de dimensionamiento tanto de la válvula como del actuador, ya sea por defecto de diseño del sistema o por defecto de los fabricantes.

- b) Imposibilidad de acceso a la zona de ubicación de la MOV para realizar la diagnosis y por lo tanto al no adoptar la estrategia de CBM, mayores riesgos por falta de fiabilidad y mayores costes de mantenimiento.
- c) Dificultades de accesibilidad al recinto donde se ubica la MOV generando costes adicionales ya sea para una instalación fija o temporal de los equipos de diagnosis.
- d) No se evitan los inconvenientes de las condiciones adversas para los técnicos e ingenieros como condiciones ambientales de temperatura, humedad, radiación y dificultades físicas de acceso.
- e) Mayores costes en repuestos al tener que realizar un mantenimiento preventivo con desmontajes periódicos.

Todos los problemas que se han descrito más arriba incidirán lógicamente en el coste de realización de la diagnosis y esto exigirá un estudio mucho más detallado y justificado sobre las válvulas que puedan ser objeto de CBM.

4.6. Los costes y beneficios del mantenimiento CBM

El mantenimiento según *condición o estado* (predictivo) difiere del mantenimiento por avería (correctivo) o del mantenimiento a plazo fijo (preventivo) en que requiere el control de algún parámetro indicativo del elemento a mantener. Sin embargo, el mantenimiento CBM será más eficiente y flexible que cualquiera de los otros dos tipos ya que con el control de los indicadores se podrá programar la intervención antes de que ocurra el fallo.

Por otra parte, cuando el coste de la tecnología de diagnosis como mantenimiento CBM represente un ahorro global en los costes de mantenimiento o represente un beneficio respecto a las indisponibilidades, será recomendable su utilización:

- i. Costes directos de mantenimiento. Ver 4.6.2
- ii. Beneficios respecto a las indisponibilidades con pérdida de producción. Ver 4.6.3

4.6.1. Las ventajas de la estrategia del mantenimiento CBM

Las ventajas de la política de mantenimiento basada en el examen de la condición y su control con los indicadores como RCP(t) según Jezdimir Knezevic [4] son:

- 1) Proporciona el nivel exigido de fiabilidad para cada elemento.
- 2) Reduce el coste de mantenimiento como resultado de:

- i. Una vida operativa más larga para cada elemento individual que en el caso de mantenimiento basado en la vida del sistema.
 - ii. Una mayor disponibilidad del elemento gracias a la reducción del número de inspecciones, comparado con el mantenimiento basado en la inspección.
- 3) Desde el punto de vista del apoyo logístico, proporciona una mejor planificación de las tareas de mantenimiento.
- 4) Es aplicable a todos los elementos de ingeniería.

4.6.2. Los costes directos del mantenimiento CBM

El coste directo de cada tarea de mantenimiento CMT^{46} , según Jezdimir Knezevic, está relacionado con el coste de los recursos de mantenimiento CMR^{47} utilizados directamente durante la ejecución de la tarea. El CMT es función de los siguientes parámetros:

$$CMT = f(C_s, C_m, C_p, C_{te}, C_f, C_d)$$

C_s es el coste de los repuestos, C_m es el coste del material, C_p es el coste de personal, C_{te} es el coste de herramientas y el equipo, C_f es el coste de las instalaciones y C_d es el coste de los datos técnicos.

Es necesario recalcar que los recursos necesarios para el mantenimiento son consecuencia del diseño del equipo o componente, del diseño del sistema y de la mantenibilidad del equipo y deberían analizarse por la Ingeniería de Mantenimiento en esta fase de diseño conceptual.

La expresión general del coste de cada tarea es:

$$CMT_p = C_s + C_m + C_{te} + C_f + C_d + DMT_p * HCP$$

Siendo DMT_p^{48} una variable aleatoria que representa el tiempo empleado en la tarea de mantenimiento y HCP^{49} representa el valor del coste horario del personal empleado en la ejecución de la tarea de mantenimiento.

⁴⁶ CMT: Cost of Maintenance Task

⁴⁷ CMR: Cost of Maintenance Resources

⁴⁸ DMT_p : Duration of Elapsed Maintenance Time

4.6.3. Los beneficios del mantenimiento CBM respecto a las indisponibilidades con pérdida de productividad

El mayor beneficio del CBM debe valorarse en relación a la disminución de las indisponibilidades con pérdidas de producción, por una parte, y al aumento de la seguridad de las personas y de la instalación por otra.

Para valorar los beneficios del CBM en las MOV se deben considerar tres aspectos:

- 1) Sobre la seguridad y la fiabilidad de la instalación.
En las centrales nucleares han primado los aspectos sobre la seguridad y la fiabilidad de sus ESC, siendo ambos requisitos los exigidos por el regulador (NRC y CSN). Requisitos que no sólo afectan a los equipos más significativos para la seguridad y la producción sino también a los equipos y componentes de sistemas auxiliares y cuya indisponibilidad puede poner en riesgo a los sistemas críticos para la seguridad de la instalación.
- 2) Sobre la reducción de costes de mantenimiento.
La estrategia de CBM con técnicas de predictivo se aplica en los equipos de mayor valor de la instalación por la complejidad de su mantenimiento, así como por la exigencia de mano de obra altamente cualificada y el coste de sus repuestos.
- 3) Sobre la pérdida de producción.
El tercer aspecto y no menos decisivo para una empresa eléctrica o un armador es la pérdida de producción causada por las indisponibilidades ya que tan importante es cumplir con los requisitos de seguridad exigidos por el regulador para la explotación de la instalación, como optimizar la gestión del mantenimiento para alcanzar el menor ratio de fallos. Considerando este último aspecto, podemos llegar a la conclusión de que un fallo en un sistema crítico para la seguridad o en un sistema no crítico o convencional pero imprescindible para la producción, aumentará las indisponibilidades.

Por otra parte, ha quedado patente a lo largo de este trabajo, que la fiabilidad de los sistemas y equipos se mide en función del número de fallos y además que la tecnología de diagnóstico de válvulas puede anticiparse al fallo con el control de la evolución de sus indicadores RCP y RCI. En consecuencia, se puede concluir que la fiabilidad de los MOV consideradas críticas

⁴⁹ HCP : Hourly Cost of Personnel

para la seguridad o la producción, es la mejor garantía para la seguridad de la instalación y para evitar las indisponibilidades que afecten a la producción.

Un buen ejemplo de equipo para utilizar el CBM y comparar la distinta clasificación entre una planta de generación eléctrica y un buque tipo LNG propulsado por turbina de vapor, es precisamente, dicha turbina.

En el caso de la planta de generación la turbina está acoplada al generador principal, la cual es imprescindible para la producción pero clasificada como equipo convencional, es decir que no es crítico para la seguridad de la planta, pero si para la producción de energía.

Sin embargo, en un buque tanque tipo LNG con turbina de vapor como máquina de propulsión principal, está clasificada como equipo de seguridad ya que su indisponibilidad afectará a la propulsión e incidirá directamente sobre la seguridad del buque y de las personas.

Por lo tanto, es fácil suponer que el fallo de un componente electrónico o válvula motorizada de los sistemas auxiliares de la turbina de vapor podría provocar la indisponibilidad de la misma con el consiguiente riesgo de pérdida de producción en una central o de pérdida de propulsión en el buque, con riesgos para la seguridad.

4.6.4. Los costes de la tecnología de diagnóstico desde el CCM

En las centrales nucleares los requisitos del CSN sobre la verificación de *la tasa de supervivencia* de las MOV, sólo acepta los métodos de diagnóstico con comprobación y control de tendencia de su Estado que utilizan tanto los parámetros mecánicos de esfuerzo y par como los parámetros eléctricos en su conjunto.

No cabe la posibilidad de un control únicamente con la diagnosis de parámetros eléctricos. Esta tecnología cabría como recomendación de seguimiento complementaria, lo cual supondría un aumento de costes.

Otra cosa sería la utilización de la diagnosis de parámetros eléctricos desde el CCM en una central de nueva construcción o un buque. Por este motivo, no existe valoración de costes de dicha tecnología y no cabe la comparación de los mismos respecto a los otros métodos.

Sin embargo, los equipos utilizados para la diagnosis desde CCM tienen un coste muy inferior a los utilizados para una diagnosis “in situ” con medida de parámetros mecánicos y además el análisis de los datos puede realizarse de forma remota por un ingeniero especialista que además tendría la capacidad de controlar todas las MOV de un buque o de toda la flota. Sin mencionar la posibilidad de utilizar un sistema experto y la inteligencia artificial.

4.6.5. Estudio de las indisponibilidades de las MOV en una central nuclear

En las centrales nucleares se hace un seguimiento de la Tasa de supervivencia de las MOV sometidas a diagnosis de forma detallada para cada una de manera que, hasta el momento y desde que se inició el Programa de control, siempre se han realizado las tareas de mantenimiento preventivo antes de que se alcanzara el punto crítico RCP_{cr} en la tendencia de su *condición*.

Ello supone que la intervención por mantenimiento se ha anticipado al fallo y no se ha generado indisponibilidad. Si no fuera así, el fallo de una MOV clasificada en su condición de servicio Severo y Riesgo Alto, ver 2.7, podría generar la indisponibilidad de un sistema crítico para la seguridad con la consecuente parada de la central además del preceptivo informe al CSN del análisis de causas y de la pérdida de producción.

Por ello, no existe un control estadístico de indisponibilidades de las MOV. (Consulta realizada a ANAV el 18/03/2018 y respuesta del 23/03/2018 y a Tecnatom en reunión del 13/03/2018.)

Aun así, están identificados cuatro tipos de fallo sin que por ello se generen indisponibilidades y que son:

- Fuga en el interior, es decir, entre aguas arriba y aguas abajo del obturador de la válvula, que es aceptable siempre que esté dentro de los límites permitidos por la norma.

- Fuga hacia el exterior por la tapa o por la empaquetadura. Dichas fugas también tienen unos límites admisibles y se pueden solucionar normalmente con reaprietes.
- Mala señalización de la MOV. La válvula puede cerrar o abrir correctamente, lo cual puede detectarse por otros indicadores de presión y caudal de la línea de tubería, pero la señalización es incorrecta y puede solucionarse sin inoperatividad necesariamente.
- Agarrotamiento parcial. Puede solucionarse con la tares de re-engrase.

Los cuatro tipos de fallo se pueden solucionar con las tareas 2 y 4 que aparecen en el apartado siguiente.

4.6.6. Análisis de costes del Plan de Mantenimiento con la utilización de la tecnología de diagnosis en las MOV

Se consideran, como la referencia más actualizada sobre la incidencia de la utilización de la tecnología de diagnóstico sobre los costes del Plan de mantenimiento de las MOV en las centrales nucleares de ANAV, los siguientes documentos de:

- Xavier Pujol Barricarte de la Dirección de Servicios Técnicos [45], ver 2.7.
- Albert Nieves García de Gestión de trabajos de recarga [53]

Tomamos los datos de costes de mantenimiento de las MOV de ANAV

Figure 22 : Costes de Tareas de mantenimiento MOV

Tarea	COSTE UNITARIO	
2. Inspección y Engrase	200 €	(1)
3. Diagnósis	3.000 €	
4. Revisión Eléctrica del Actuador	300 €	(2)
5. Revisión Mecánica del Actuador	3.500 €	
6. Revisión Mecánica de la Válvula	2.500 €	

(1) La TMP de Inspección y Engrase no tiene un coste de referencia por no realizarse anteriormente. Habiéndose consultado al contratista actual se estima un coste unitario de 200€.

(2) La TMP de Revisión Eléctrica tenía un costa de 600€, que debido a la reducción del alcance de la intervención se reducirá a 300€.

Fuente 27 : Albert Nieves Plan Mantenimiento MOV de ANAV

A partir de esta tabla, se pueden diferenciar las tareas TMP⁵⁰ entre las que se realizan durante la operación del sistema, tareas 2 y 4, y sin generar inoperatividad, y las que deben realizarse con descargo, tareas 3, 5 y 6, es decir generan inoperatividad.

Por otro lado, hay que mencionar que las tareas 2 y 4 pueden realizarse con personal propio de la central o del buque al contrario que las 3, 5 y 6 que generalmente se realizarán en parada de recarga o revisiones en astillero del buque, por necesitar equipos y mano de obra especializada.

En el caso de que se utilizara una monitorización en continuo, ver 2.5.3, las frecuencias de aplicación de las tareas 3, 5 y 6 se alargarían en el tiempo y por lo tanto se reducirían los costes.

No se puede pasar por alto el hecho de que los costes de cualquier tarea de mantenimiento en una central nuclear son mayores que en una central convencional del orden de un 20% por los requisitos de control y acceso y especialmente con las condiciones radiológicas de algunas de las ubicaciones de las MOV.

Se puede afirmar que una vez adoptada la estrategia más adecuada para las MOV respecto a la relación fiabilidad/costes, se optó por aumentar la frecuencia de diagnóstico de forma que sea múltiplo de las frecuencias de revisión con desmontaje del actuador y de la válvula. Ver 2.7.3

Esta estrategia representa:

- Una mayor fiabilidad del componente al aumentar la frecuencia de diagnóstico
- Una reducción de las intervenciones de revisión de actuador y válvula
- Un ahorro del coste directo de mantenimiento

Respecto a los costes del Plan de mantenimiento se puede constatar que con esta estrategia se alcanza un ahorro sobre los costes de mantenimiento del 25%. Ver [45]

⁵⁰ TMP : Tarea Mantenimiento Programado

4.6.7. Otros aspectos sobre los costes

Estimar los beneficios de la utilización de la tecnología de diagnóstico de las MOV no es fácil, pero basta con considerar las pérdidas de producción en una planta de generación eléctrica, que pueden valorarse en millones de euros/día, o de los riesgos para la seguridad del buque y las penalizaciones contractuales por incumplimiento de las fechas del flete. El éxito de la tecnología de diagnóstico como mantenimiento basado en el examen de la *condición* de las MOV residirá fundamentalmente en un buen estudio de la Ingeniería de Mantenimiento con los criterios de la técnica RCM u otras similares para determinar las MOV que deben ser controladas con dicha tecnología.

Finalmente, cabe considerar que no supone el mismo esfuerzo económico la implantación de los recursos necesarios para la tecnología de diagnóstico de válvulas en un buque que ya se encuentre en explotación que el que supone en un buque en fase de diseño. En el primer caso, los recursos económicos necesarios se consideran gastos de mantenimiento en la cuenta de resultados mientras que en la fase de construcción se considera inversión dentro del proyecto del buque.

CAPÍTULO V. Conclusiones

Este capítulo presenta las conclusiones de esta tesis. Comienza con la propuesta y la exposición de los objetivos alcanzados y continúa con las conclusiones sobre la investigación realizada. Finaliza con las reflexiones sobre la tesis y las propuestas sobre futuras investigaciones.

5.1. Sobre la propuesta de tesis

En el Capítulo I se ha expuesto la propuesta de la tesis, la cual se basa en la innovación a través de la transferencia tecnológica entre distintos sectores industriales, partiendo de la aplicación de una nueva tecnología que ha demostrado su efectividad en la mejora de la fiabilidad de las válvulas motorizadas y en consecuencia, la mayor seguridad y disponibilidad de la planta o del buque.

Para ello, ha sido realizado una exhaustiva investigación del Estado del Arte en ambos sectores industriales para determinar, por un lado, que la tecnología de diagnóstico ha supuesto un gran avance en la Ingeniería de mantenimiento en el sector nuclear, y por otro lado que dicha tecnología ofrece una significativa y viable innovación en mantenimiento de válvulas motorizadas en la industria naval.

Se ha demostrado, a través del estudio y análisis detallado de los sistemas del buque, que los tipos de MOV utilizadas son susceptibles de someterse a la estrategia CBM con la diagnosis de válvulas y así alcanzar el objetivo de aumentar su fiabilidad y disponibilidad superando las incertidumbres del mantenimiento preventivo por plazos.

Finalmente, se proponen las distintas aplicaciones de diagnóstico de válvulas a lo largo del Ciclo de Vida como metodología para innovar en la Ingeniería de mantenimiento del buque.

5.2. Los objetivos alcanzados

El objetivo fundamental se pone de manifiesto a lo largo de la investigación al constatar que la tecnología de diagnóstico de válvulas motorizadas ha demostrado su efectividad en las centrales nucleares y por otro lado que es, así mismo, aplicable en los buques en tanto en cuanto que las válvulas y los actuadores son similares técnicamente a los utilizados en el

sector energético. Además, los diseños y las funciones de las MOV, en los sistemas donde se encuentran instaladas, cumplen con los mismos objetivos de control y regulación.

Los sub-objetivos alcanzados en esta tesis son fundamentales para demostrar la posibilidad de innovar en la industria naval y todos ellos han quedado argumentados y probados entre los capítulos II y IV.

- Se ha demostrado la posibilidad de mejorar la seguridad, la fiabilidad y la disponibilidad de las MOV con la investigación de las distintas tecnologías de diagnóstico disponibles para la “*vigilancia de la condición*”
- Se ha evidenciado la perspectiva de mejora del índice de fallos e indisponibilidades de operación de los sistemas donde se encuentran instaladas las MOV
- Con el análisis de los sistemas del buque, se ha determinado el alcance y la viabilidad de las estrategias de mantenimiento aplicables en las válvulas motorizadas.
- Se ha constatado la capacidad de innovación con las diferentes tecnologías de diagnóstico de válvulas aplicables durante el ciclo de vida del buque.
- Se han confirmado los beneficios técnicos y económicos basados en el impacto previsto con la aplicación de la tecnología de diagnóstico de válvulas motorizadas en los buques.

5.3. Conclusiones

Como primera conclusión, se puede afirmar que en la industria nuclear se ha constatado que la diagnosis de válvulas es la única tecnología disponible actualmente para evaluar la *condición* de una MOV, garantizando su fiabilidad y su disponibilidad hasta la siguiente revisión por mantenimiento programado o por parada de la planta. Esta conclusión se hace extensiva a los buques respecto a los reconocimientos periódicos obligatorios.

La segunda conclusión es que se abre la posibilidad de innovar sobre la Ingeniería de mantenimiento de los buques con la transferencia tecnológica del mantenimiento basado en la *condición* de las MOV, superando las incertidumbres del mantenimiento preventivo por plazos.

La tercera conclusión es sobre los beneficios respecto a los costes del Plan de mantenimiento ya que se ha constatado en las centrales nucleares que se alcanza un ahorro sobre los costes de mantenimiento del 25%, utilizando la estrategia CBM con tecnología de diagnóstico en las MOV y que dichos beneficios, en consecuencia, son extrapolables a la industria naval.

Por otro lado, los beneficios del mantenimiento basado en la *condición* de las MOV no deben limitarse a los costes directos del Plan de mantenimiento sino que los más significativos son los relacionados con la seguridad y la producción al evitarse indisponibilidades reduciendo el ratio de fallos en los sistemas donde se encuentran instaladas.

5.4. Reflexiones sobre futuras investigaciones

Esta tesis descubre nuevos campos de investigación dado que a bordo de los buques se pueden utilizar distintos tipos de actuadores, ya sean motorizados, neumáticos e hidráulicos y que por otro lado la industria nuclear ha desarrollado la tecnología de diagnóstico de válvulas tanto para los actuadores motorizados como los neumáticos con satisfactorios resultados.

Se abren nuevos campos de investigación, en consecuencia, sobre:

- La futura aplicación de la diagnosis de válvulas neumáticas en la industria naval.
- El desarrollo de la tecnología de diagnosis de válvulas con actuadores hidráulicos.
- La aplicación de la diagnosis de válvulas actuadas sobre otro tipo de buques.
- La utilización de sistemas expertos e inteligencia artificial para el análisis de la diagnosis de válvulas.

TRABAJOS CITADOS

- [1] R. Grau, “Glosario de mantenimiento,” FNB/Barcelona, 2017.
- [2] A. Crespo Márquez, P. Moreu de León, and A. J. Sánchez Herguedas, *Ingeniería de mantenimiento :técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos*. Madrid : AENOR, 2004.
- [3] IRIM, *Elaboración planes mantenimiento*. Renovetec, 2015.
- [4] J. Knezevic, *Mantenimiento por Jezdimir Knezevic*. 1996.
- [5] A. S. Cuevas Badallo, “Ciencias Ingenieriles.,” 2003, vol. 6, no. 2003, pp. 9–10.
- [6] J. Moubray, *Reliability-centered maintenance*, 2nd ed. New York, N.Y. : Butterworth Heinemann, 1997.
- [7] J. Hosler, “Clarification of TMI Action Plan Requirements,” 1983.
- [8] B. Muñoz, “Mantenimiento Industrial,” Madrid: Universidad Carlos III, 2015.
- [9] Aenor, *UNE-EN 13306 : terminología del mantenimiento*. Madrid : AENOR, 2011.
- [10] AMPC, *Engineering Design Handbook: Maintenance Engineering Techniques*, AMPC 706-1., no. June. Washintong, D.C., 1975.
- [11] Instituto Andaluz de Tecnología (IAT), *La respuesta esta en la innovac - Instituto Andaluz de Tecnologia*. Madrid, 2012.
- [12] Comisión Europea, *Libro Verde sobre Innovación*. 1995.
- [13] OECD and Eurostat, *Manual de Oslo*, vol. 30, no. 5. 2007.
- [14] N. Pr and D. Experimental, *Manual de Frascati*. 2002.
- [15] J. Hosler, “Nuclear Maintenance Applications Center : Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants – Revision 2,” 2007.

- [16] J. Lee, “Intelligent Maintenance Systems and Predictive Productivity (Vision and Perspectives),” 2000.
- [17] S. García Garrido, *Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento industrial*. 2009.
- [18] IRD Mechanalysis, “Condition Monitoring Solutions,” 2015. [Online]. Available: <https://www.irdmechanalysis.com/content/about-us/our-vision-our-mission/>.
- [19] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, “A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,” in *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510.
- [20] S. O. Duffuaa and K. J. Ben-Daya, Mohamed, *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. 2009.
- [21] J. Campbell, *Strategies for excellence in maintenance management*, Productivi. Portland, 1995.
- [22] A. Creus, *FIABILIDAD Y SEGURIDAD*, Segunda ed. Barcelona, 2005.
- [23] T. Walker, “MOV Performance Prediction Methodology. TR 111383,” 2008.
- [24] EPRI, “MOV PPP. Program Guidance for Procurement of Gate , Globe , and Butterfly Valves,” in *1009218*, 2003.
- [25] ABS (American Bureau of Shipping), “Surveys Based on Machinery Reliability and Maintenance Techniques,” no. April, 2016.
- [26] A. Varela, “Technology in valve maintenance,” 2015, p. 15.
- [27] NRC, “NRC Action Plan Developed as a Result of the TMI-2 Accident,” 1980.
- [28] G. 89-10, “U . S . Nuclear Regulatory Commission,” 2006.
- [29] GL 96-05, “U . S . Nuclear Regulatory Commission,” 1996.

- [30] NRC, “GL96-05 Safety Evaluation,” 2011.
- [31] NRC, *Regulatory Guides, 10CFR50, Appendix B*. U.S. Washintong DC, 2015.
- [32] J. Simons, *EPRI MOV PPP. TR-103237-R1-T1.pdf*. EPRI, 1995.
- [33] OMI, *SOLAS EDICIÓN REFUNDIDA 2002*, vol. 53. 1989.
- [34] J. Rodrigo, D. L. Profesor, and D. Marítimo, “(MARITIME SAFETY AT GAS CARRIERS).”
- [35] IMO, “Resolución 746_18.pdf,” 1993.
- [36] IMO, *IGC Liquefied Gases in Bulk*. 2009.
- [37] Crane, “T echnical Description nuC.”
- [38] Teledyne, “SENTRY,” 2018. [Online]. Available: <http://teledyne-ts.com/products/sentry.html>.
- [39] Teledyne, “MIDAS MOV Design & Test Database Software,” 20185. [Online]. Available: <http://teledyne-ts.com/products/midas.html>.
- [40] Teledyne, “SMARTSTEM Transducer Description,” 2010. [Online]. Available: <http://teledyne-ts.com/products/smartstem.html>.
- [41] Teledyne, “QUIKLOOK 3-FS Valve Diagnostic System,” 2018. [Online]. Available: <http://teledyne-ts.com/products/quiklook3.html>.
- [42] Kalsi Engineering, “Kalsi mov_actuator_test_stand,” 2017. [Online]. Available: https://www.kalsi.com/sites/default/files/literature/valve_actuator_products_services.pdf.
- [43] J. K. (EPRI) Wang, “Application Guide. MOV. TR-106563-V1,” 1999.
- [44] EPRI, “TR-106857- R1- Preventive Maintenance Basis,” 1998.

- [45] X. P. Barricarte, “Programa de actividades de Válvulas Motorizadas : Optimización y planificación a largo plazo,” *SNE*, pp. 4–6, 2017.
- [46] R. W. Greene, *The Chemical Engineering Guide to Valves*. New York, N.Y. :, 1984.
- [47] Cargo Book and Teekay, *Catalunya Spirit Catalunya Spirit*. 2005.
- [48] Machinery Book Teekay, “Catalunya Spirit LIST OF CONTENTS : Catalunya Spirit,” 2005.
- [49] Hispania Spirit. Cargo book, *Cargo Operating Manual*. .
- [50] Hispania Spirit. Machinery book, *Machinery Operating Manual*, Teekay Shi. .
- [51] Acciona, “RO-RO Entrecanales JM,” in *Manual del buque*, Navantia, Ed. Sestao, 2010.
- [52] A. Varela, “Innovación y Transferencia Tecnológica en Ingeniería de Mantenimiento,” *SNE*, pp. 4–6, 2017.
- [53] N. Albert, “Plan Mantenimiento MOV de ANAV,” Tarragona, 2017.
- [54] L. A. Flowserve, “Limitorque Actuation Systems 120-11000,” 2002.

OTRAS REFERENCIAS

1. ABS, “American Bureau of Shipping,” <https://ww2.eagle.org/en.html>, 2018. [Online]. Available: <https://ww2.eagle.org/en.html>. [Accessed: 20-Jan-2018].
2. ABS (American Bureau of Shipping), “Guidance Notes On Equipment Condition Monitoring Techniques,” Houston, TX 77060 USA, 2016.
3. Acciona, “RO-RO Entrecanales JM,” in *Manual del buque*, Navantia, Ed. Sestao, 2010.
4. X. P. Barricarte, “Implantación del Programa de Válvulas Motorizadas en ANAV,” 2013, pp. 25–27.
5. M. Bridges, “Nuclear Maintenance Applications Center : Preventive Maintenance Basis for FLEX Equipment Project Overview Report,” Palo Alto USA, 2013.
6. A. L. G. Carneiro, A. A. d. Silva, and B. R. Upadhyaya, “Incipient fault detection of motor-operated valves using wavelet transform analysis,” in *Nuclear Engineering and Design*, 2008, vol. 238, no. 9.
7. Crane, “Flow of fluids through valves, fittings, and pipe. Technical Paper No. 410 (TP 410),” 2009.
8. M. Data, “General Engineering Data,” 2015.
9. P. Dicquemare, “Improved diagnostics is the key to predictive maintenance of valves,” 1997.
10. S. Dietrich and W. Kahle, “Optimal imperfect maintenance in a multi-state system with two failure types,” in *Proceedings - 2nd International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science, and Operations Management, SMRLO 2016*, 2016, pp. 233–243.
11. Electric Power Research Institute, “EPRI.” [Online]. Available: <https://www.epri.com/#/>.
12. EPRI, “Technical repair guidelines for the Limitorque model SMB-000 valve actuator,” 1994.
13. Flowserve, “Flowserve. Limitorque,” *web*. [Online]. Available: <http://www.flowserve.com/en/login>.
14. L. Furlanetto, *Manutenzione produttiva. L'esperienza del TPM in Italia*. 1991.
15. J. M. Guisado, “Mejorar la Fiabilidad de la planta, mediante una gestión integral de las válvulas de control,” *Mantenimiento. Ing. Ind. y Edif.*, vol. Num 309.
16. A. P. W. Hills, D. Man, and F. Engs, “Mechanalysis (India) Limited On-Line Machinery Condition Monitoring Diagnostics Mechanalysis (India) Limited On-Line Machinery Condition Monitoring Diagnostics,” 2005.
17. Holstrom.J.R., “Application Guide for Evaluation of Actuator Output Capability for Air- Operated Valves in Nuclear Power Plants,” 1997.
18. E. by J. W. Hutchinson., *ISA Handbook of Control Valves, 2nd. Edition*, . .
19. H. Ito, M. Akiyama, and S. Suzuki, *The wireless diagnostic system for motor operated valves*. 2014.

20. S. Kang, S. Park, D. Lee, Y. Kim, and D. Kim, "A study on the stem friction coefficient behavior of motor-operated valves," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 241, no. 3, 2011.
21. S. Kang, S. Park, D. Lee, Y. Kim, and D. Kim, "A study on the actuator efficiency behavior of safety-related motor operated gate and globe valves," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 239, no. 12, 2009.
22. C.-H. Kim, J.-H. Park, D.-Y. Lee, and I.-S. Koo, "Development of a smart type motor operated valve for nuclear power plants," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2005, vol. 6042 I.
23. D.-W. Kim and S.-Y. Yoo, "Effects of differential pressure on the performance of motor operated flexible wedge gate valve," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, vol. 31, no. 2, 2007.
24. I. Mechanalysis, "IRD Mechanalysis." [Online]. Available: <http://www.irdmechanalysis.com/content/contact-us/locations/>.
25. T. Neckowicz, "Standardized MOV program," *Nuclear Plant Journal*, vol. 22, no. 5, 2004.
26. L. Pitkin, "ucus Learning ea g Series Se es Motor Operated Valve Seismic i i – Weak k Link i k Analysis," 2010.
27. M. Predictiva and D. A. Neumáticos, "la Seguridad de C . N . Cofrentes
28. M. V. Prera, J. E. Espartero, G. De Figuera, P. D. Fernández, I. M. Aldana, D. Ramírez, and A. B. Pérez, "Revisión hipóteis diseño MOV," 2013, pp. 1–8.
29. T. Report, "Application Guide for Evaluation of Actuator Output Capability for Air-Operated Valves in Nuclear Power Plants," vol. 3, no. 3, 2006.
30. T. Report, "Technical Repair Guide for Rotork Valve," vol. 3, no. 3. 2006.
31. T. Report, "Technical Repair Guidelines for Limitorque Gear Operator Models HBC 0-10," vol. 3, no. 3, 2006.
32. T. Report, *Application Guide for Motor-Operated Butterfly Valves in Nuclear Power Plants*. 1993.
33. R. Rodrigo De Larrucea, "(Maritime Safety At Gas Carriers)," Barcelona, 2010.
34. P. A. Schweitzer, *Handbook of valves*, Reprint ed. Malabar, Florida 32950, 1982.
35. J.-H. Shin and H.-B. Jun, "On condition based maintenance policy," in *Journal of Computational Design and Engineering*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 119–127.
36. K. Shincheul, P. Sungkeun, L. Dowhan, and K. Yangseok, "MCC-based technology study for safety-related motor operated valves," in *Proceedings of the American Nuclear Society - International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2005, ICAPP'05*, 2005, vol. 4.
37. K. Singh, "Of Sun Gods and Solar Energy," *ISSUES Sci. Technol.*, vol. 33, no. 2, pp. 48–54, 2017.
38. SMB Limitorque, "Installation and Maintenance," 2004.
39. S. L. SMB, "Limitorque SMB Series," Flowserve, 2002.

40. A. M. Smith and G. R. Hinchcliffe, *RCM: gateway to world class maintenance*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
41. S. Suzuki, S. Nakamura, S. Saishu, K. Okiguchi, and O. Okada, "The development of in-situ diagnostic analysis for motor operated valves," in *COMADEM 2010 - Advances in Maintenance and Condition Diagnosis Technologies Towards Sustainable Society, Proc. 23rd Int. Congr. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, 2010.
42. L. A. Systems, "Limitorque Actuation Systems 120-11000," *ReVision*, no. September, 2002.
43. B. S. Wilkerson, "Electric motor-operated valve actuators can tell you a lot about their condition if you take advantage of sophisticated diagnostics available from current designs combined with networking protocols. This tutorial can help you put those capabilities to work," *Control Engineering*, vol. 56, no. 11, 2009.
44. R. N. Wurzbach, "Streamlined grease analysis to complement vibration and other diagnostic technologies," in *Technical Program for the MFPT 2010 Conference - Transition: From R and D to Product*, 2010.
45. R.-M. Zander, T. Findler, and J. Adamczyk, "Online-monitoring of motor operated valves," *Kerntechnik*, vol. 67, no. 4, 2002.
46. Resumen hipótesis IDOM revisión de diseño.
47. Ponencia Tecnatom. Pruebas de diagnóstico en las válvulas de aislamiento de las líneas de vapor principal de la unidad I de la CN Laguna Verde (México).

ANEXO 1 DESCRIPCIÓN Y COMPROBACIONES EN UNA MOV

El anexo 1 detalla el alcance definido en el apartado 2.4

A.1. Descripción y Comprobaciones en una MOV

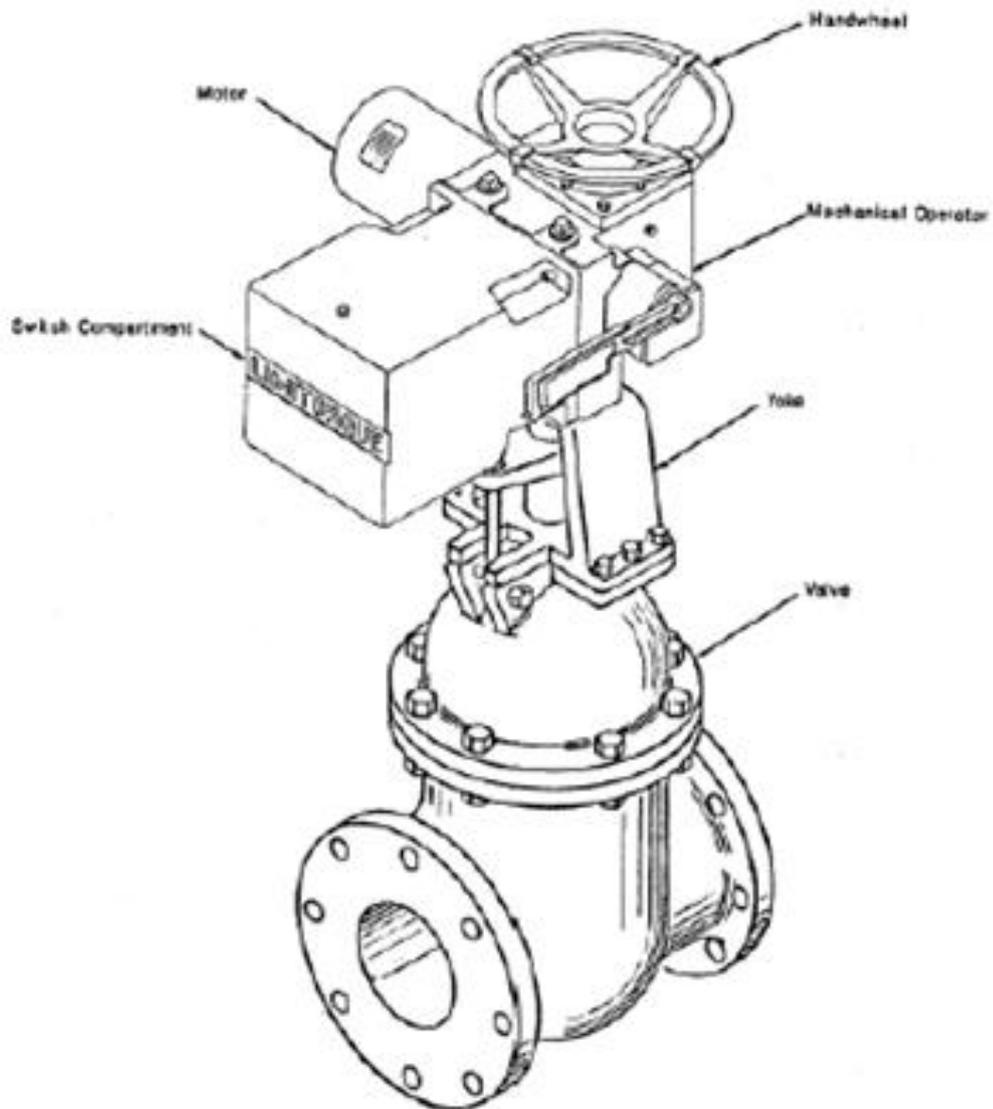
A.1.1. Descripción general

Se entiende por válvula motorizada el conjunto formado por: [43] [54]

- a) La válvula propiamente dicha
- b) El actuador
- c) El puente o yugo

Se separa el puente porque es el nexo de unión entre la válvula y el actuador. Es un componente puramente pasivo pero de gran importancia en la diagnosis ya que se utilizan las deformaciones producidas en él para determinar las fuerzas ejercidas por el vástago. En el conjunto de esos componentes siempre hay dos fabricantes, el de la válvula y del actuador donde se incluye el puente. Ver: Figure 23.

Figure 23 : Conjunto válvula-actuador



Fuente 28 : EPRI

A.1.1.1. Descripción de la válvula

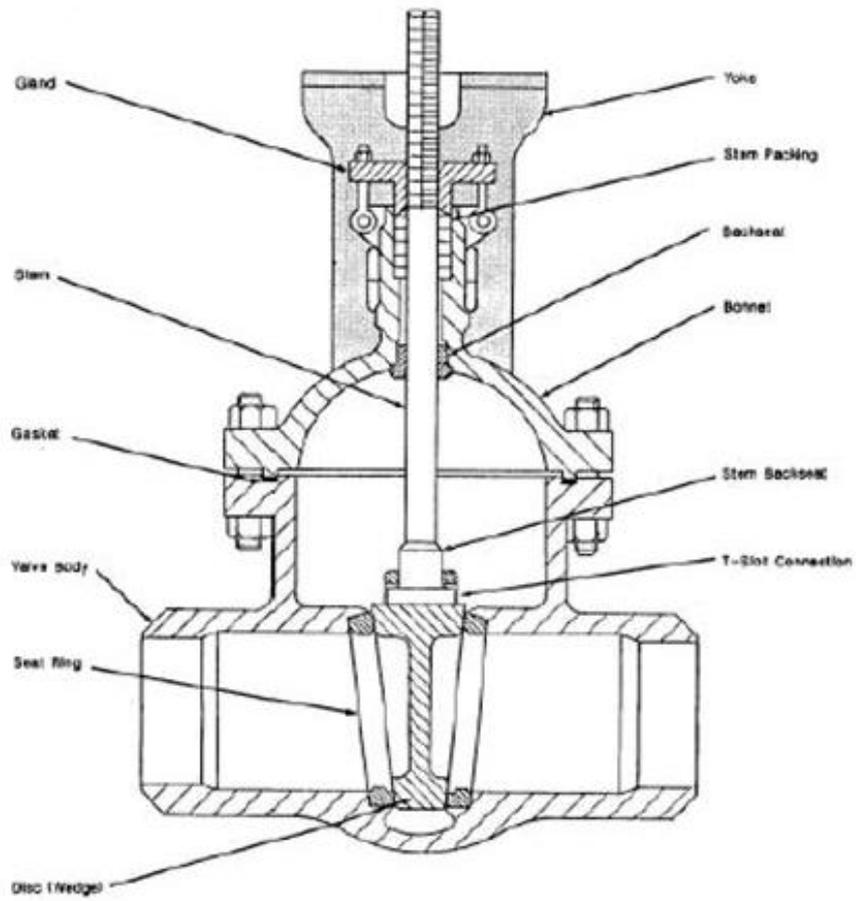
La válvula puede ser de diferentes tipos en función de los requisitos del proceso: globo, compuerta, mariposa, bola, etc.

En la Figure 24, podemos ver los componentes típicos de una válvula de compuerta.

Se incluyen los siguientes componentes:

- a) Cuerpo de válvula. (Valve body)
- b) Bonnet
- c) Yugo (Yoke)
- d) Empaquetadura (Stem Packing)
- e) Prensa (Gland)
- f) Eje (stem)
- g) Disco (disc)
- h) Asiento posterior (Back Seat)
- i) Conexión en T (T Slot Connection)
- j) Anillos cierre (Seat rings)

Figure 24 : Válvula de compuerta

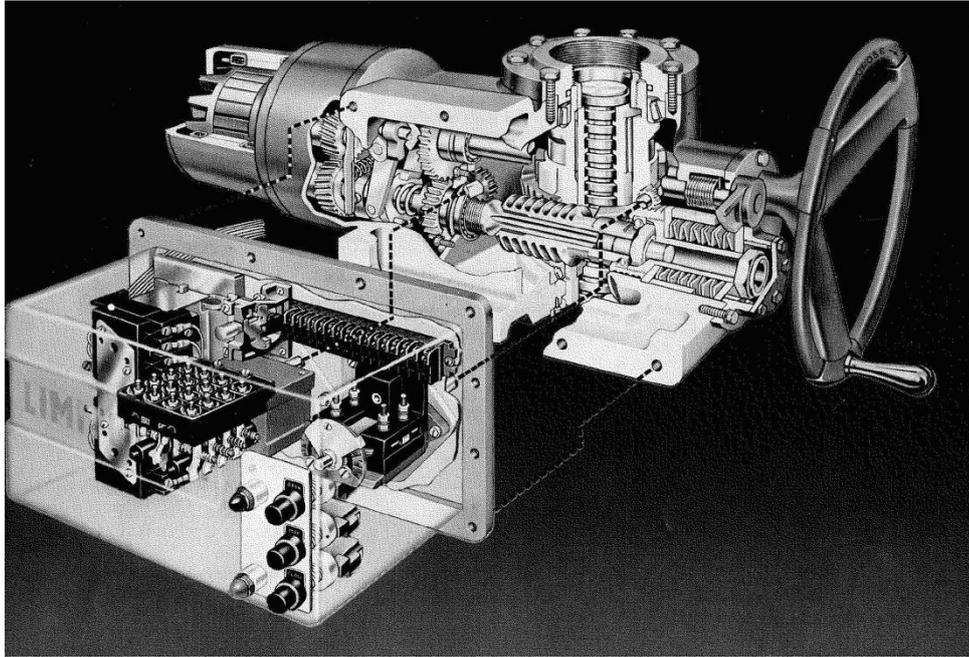


Fuente 29 : EPRI

A.1.1.2. Descripción del actuador Limitorque SMB

En la Figure 25, puede observarse el actuador de una válvula correspondiente al fabricante Limitorque.

Figure 25 : Actuador Limitorque SMB



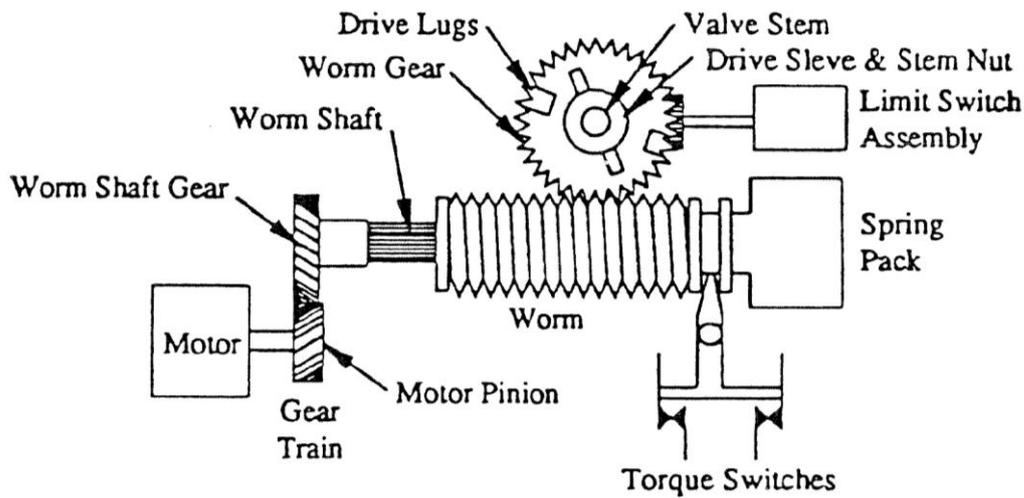
Fuente 30 : Limitorque

En la Figure 26, se representan esquemáticamente los mecanismos del actuador de una válvula motorizada que vamos a describir brevemente.

- a) Motor eléctrico
- b) Tren de engranajes (Gear train)
- c) Corona/sin-fin (worm/gear/worm)
- d) Eje estriado (worm shaft)
- e) Vástago de válvula (valve stem)
- f) Tetones de golpeo (drive lugs)
- g) Eje de golpeo (drive sleeve/stem nut)

- h) Finales carrera (limit switch assembly)
- i) Interruptores de par (torque switches)
- j) Paquete de muelles (spring pack)

Figure 26 : Esquema actuador



Fuente 31 : EPRI

El motor al girar transmite el par de fuerzas a través del tren de engranajes del eje estriado donde se encuentra el sin-fin (worm), el cual tiene la posibilidad de desplazarse transversalmente a lo largo de este eje debido a la disposición del estriado macho/hembra. El movimiento giratorio del sin-fin se transmite directamente y perpendicularmente a la corona a través de sus dientes. La corona a través de los tetones transmite el movimiento circular a la tuerca (no representada), la cual al girar sube/baja el husillo de la válvula.

Cuando el husillo encuentra una resistencia, ésta se transmite a la tuerca, de la tuerca a través de los tetones se transmite a la corona y de la corona pasa al sin-fin, en estas condiciones como el motor sigue empujando, si la resistencia es suficientemente grande hace que el sin-fin se desplace a través de los dientes de la corona como si fuera un mecanismo piñón-cremallera. Al desplazarse comprime los muelles (spring-pack) que se encuentran dispuestos

transversalmente hasta que se encuentra un punto de equilibrio. Al desplazarse mueve la palanca del interruptor de par (torque switch) cortando la corriente y parando el motor eléctrico.

Los finales de carrera son unos interruptores que se activan abriendo-cerrando (hay 4 interruptores) en una determinada posición, sincronizando estas maniobras haremos que los finales de carrera cierren o abran cuando la válvula cierre o abra parando el motor eléctrico al llegar a esa posición

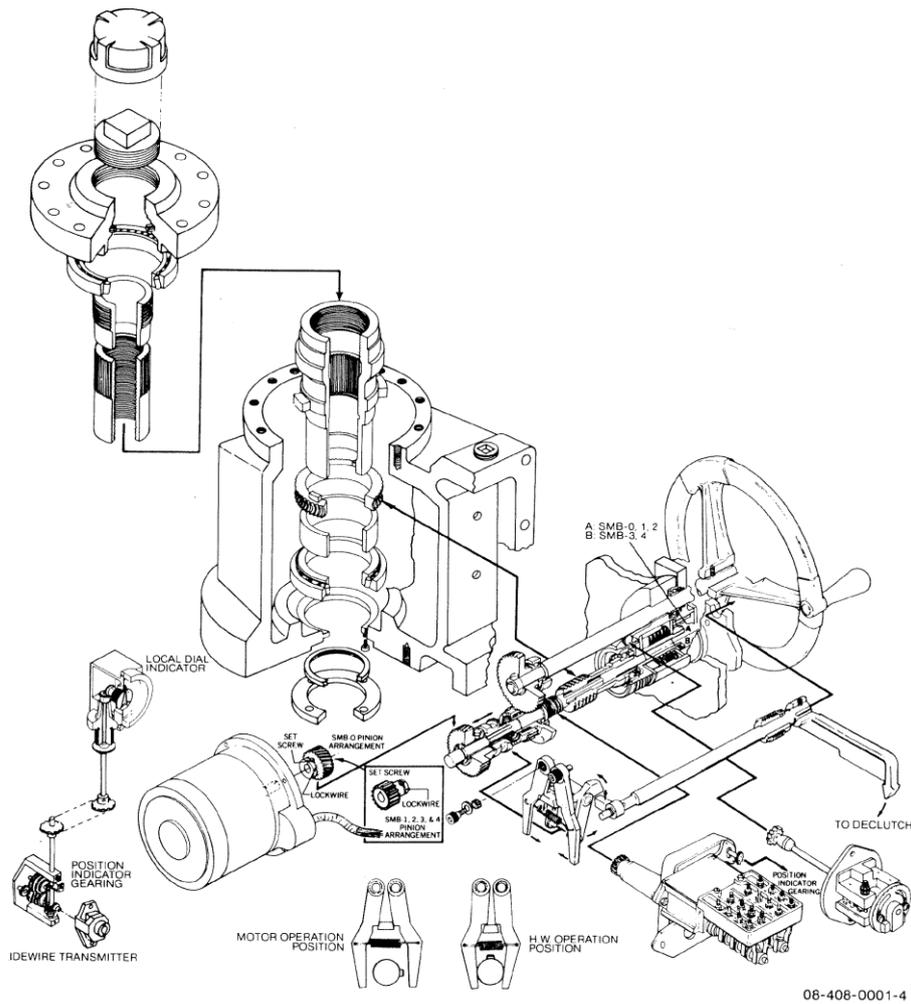
La función de los tetones del conjunto eje-corona tiene como finalidad evitar que el motor arranque en carga.

La corona gira aproximadamente 180° antes de que sus tetones empujen a los de la tuerca que desplazarían al husillo.

En la Figure 27, puede verse un despiece típico de un actuador Limitorque mostrando todos sus mecanismos internos.

Figure 27 : Despiece Actuador SMB

SMB-0 TO SMB-4 & SMB-4T



Fuente 32 : Limitorque.

A.1.2. Comprobaciones

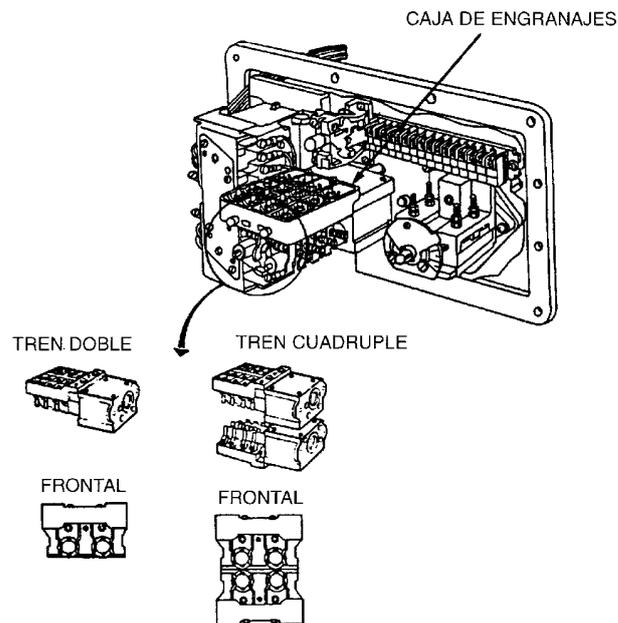
En la Figure 28, se pueden ver los internos de la caja de engranajes que deben someterse a las siguientes comprobaciones:

- a) Comprobación de los interruptores de par.

Los actuadores motorizados pueden tener 2 ó 4 trenes de interruptores de fin de carrera. En el caso de ser de 4 trenes, el actuador tiene dos cajas de engranajes.

- b) Comprobar la lubricación de los engranajes.
- Quitar la cubierta de la caja de engranajes.
 - Inspeccionar el estado del lubricante. Si es necesario, añadir lubricante a los engranajes.
 - Instalar de nuevo la cubierta de la caja de engranajes.

Figure 28 : Caja de engranajes de interruptores fin de carrera

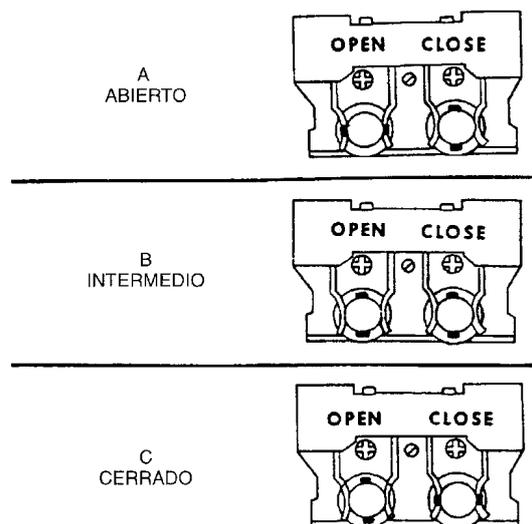


Fuente 33 : Limitorque

- c) Comprobar la operación de los interruptores de fin de carrera (ver Figura 29):
- Poner la palanca “manual-auto” en manual y girar el volante, para dejar el actuador en manual.
 - Abrir totalmente las válvulas. Los contactos deben estar en la posición A. Si esto no fuese así seguir el procedimiento de ajuste de los interruptores fin de carrera.
 - Colocar la válvula en posición intermedia. Los contactos se situarán en la posición B. En caso contrario seguir el procedimiento de ajuste.
 - Cerrar totalmente la válvula y comprobar que los contactos se sitúan en la posición C. Si esto no fuese así, proceder a ajustar los finales de carrera.

NOTA: En el caso de actuadores con cuatro trenes, será necesario ajustar también las posiciones intermedias de acuerdo con los CWDs⁵¹, diagramas de control y cableado.

Figure 29: Frontal del tren de engranajes del fin de carrera



Fuente 34 : Limitorque

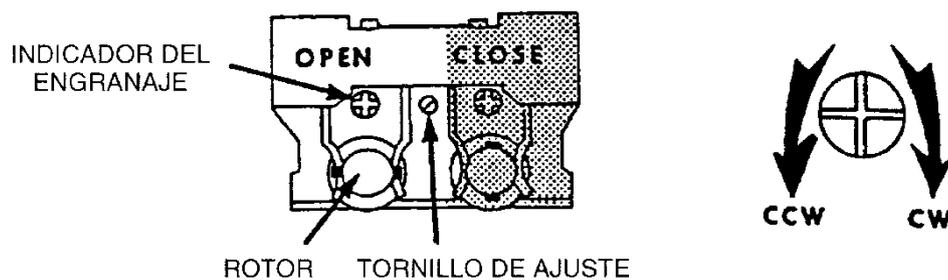
⁵¹ CWD: Diagrama Control Cableado

A.1.3. Ajuste de los interruptores final de carrera

Si los CWDs muestran contactos distintos a los indicados en este apartado y es necesario realizar ajuste de los puntos de tarado, el procedimiento descrito a continuación es válido, pero las posiciones de las válvulas para realizar el ajuste serán diferentes.

Abrir manualmente la válvula si no está totalmente abierta. Anotar la dirección de giro del indicador del engranaje anti-horario (CCW⁵²) u horario (CW⁵³). La posición totalmente abierto de muchas válvulas no corresponde con los asientos superiores de la misma, por lo que, si la válvula tiene indicador de posición del vástago, debe observarse que este se encuentre en el 100%.

Figure 30 : Ajustes de fin de carrera « abierto »



Fuente 35 : Limitorque

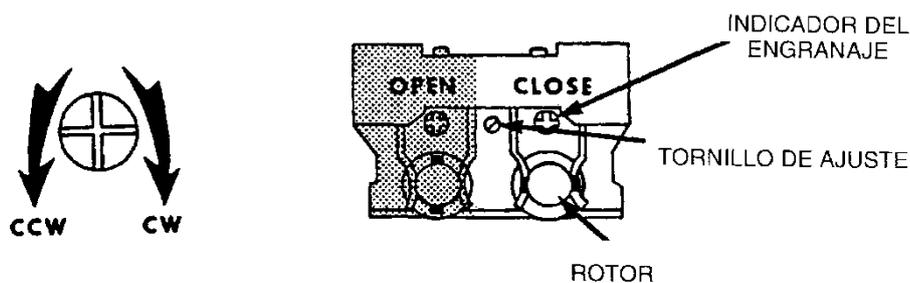
- Con la válvula totalmente abierta, girar el volante en sentido “cerrar” hasta que comience a moverse el vástago de la válvula.
- Cerrar $\frac{1}{4}$ de vuelta o más, hasta que coja carga.
- Girar el tornillo de ajuste en el sentido horario hasta que pare. No forzarlo para evitar dañar el tornillo.
- Ajustar el indicador “abierto” del engranaje:

⁵² CCW: Indicador engranaje anti-horario

⁵³ CW: Indicador engranaje horario

- Si el rotor no ha girado todavía 90° cerrando los contactos, girar el indicador en el sentido anotado en el paso “a” o hasta que gire los 90° y quede como en la Figure 30
 - Si el rotor ha girado más de 90° girar el indicador en la dirección opuesta a la anotada en el paso “a” o hasta que el rotor comience a girar. En ese momento, invertir el sentido de giro hasta dejar el rotor como muestra la Figure 30.
- e) Girar el tornillo de ajuste en sentido anti-horario hasta que pare. Comprobar que el indicador permanece bloqueado, indicando que el engranaje del rotor está ocupado. Si no sucediese esto girar de nuevo el tornillo de ajuste en sentido horario y repetir el ajuste, pasos “e” y “f”.
- f) Cerrar totalmente la válvula de forma manual. Anotar el sentido de rotación del indicador del engranaje CCW o CW.
- g) Girar el volante en sentido “ABRIR” hasta que el vástago de la válvula comience a moverse.
- h) Abrir la válvula ¼ de vuelta o más, hasta que coja carga.
- i) Girar el tornillo de ajuste en sentido horario hasta que pare.
- j) Ajustar el indicador “cerrado” del engranaje:
- Si el rotor no ha girado todavía 90°, cerrando los contactos, girar el indicador en la dirección anotada en el paso g hasta que el rotor gire 90° como se muestra en la Figure 30 : Ajustes de fin de carrera « abierto»
 - Si el rotor no ha girado más de 90°, girar el indicador en la dirección opuesta a la anotada en el paso “g” hasta que el rotor comienza a girar, invertir el sentido de giro y dejar el rotor en la posición mostrada en la Figure 31 : Ajuste de fin de carrera « cerrado ».

Figure 31 : Ajuste de fin de carrera « cerrado »



Fuente 36 : Limitorque

- k) Girar el tornillo de ajuste en sentido antihorario hasta que pare. Comprobar que el indicador permanece bloqueado, indicando que el engranaje del rotor está acoplado.

En caso contrario, girar de nuevo el tornillo de ajuste en sentido horario y repetir el ajuste, pasos “k” y “l”.

- l) Verificar que el ajuste ha sido correcto, realizando la comprobación de los interruptores de fin de carrera.

A.1.4. Comprobación del motor

El motor eléctrico del actuador se someterá a las siguientes comprobaciones:

a) Medir el aislamiento fase-tierra, comprobando que no existen cortocircuitos, aplicando 500V.

- Medir y registrar el aislamiento fase-tierra para cada fase.
- Evaluar las medidas de resistencia. Las medidas no deben discrepar en más de un 10% y la impedancia entre fase y tierra debe ser mayor de 1 Mohm.
- Si las medidas de resistencia están fuera de límites, reparar o sustituir el motor. Si están muy próximas al límite, contactar con el supervisor para tomar una decisión.

b) Si se sospecha un problema del motor o de su control, seguir el siguiente procedimiento:

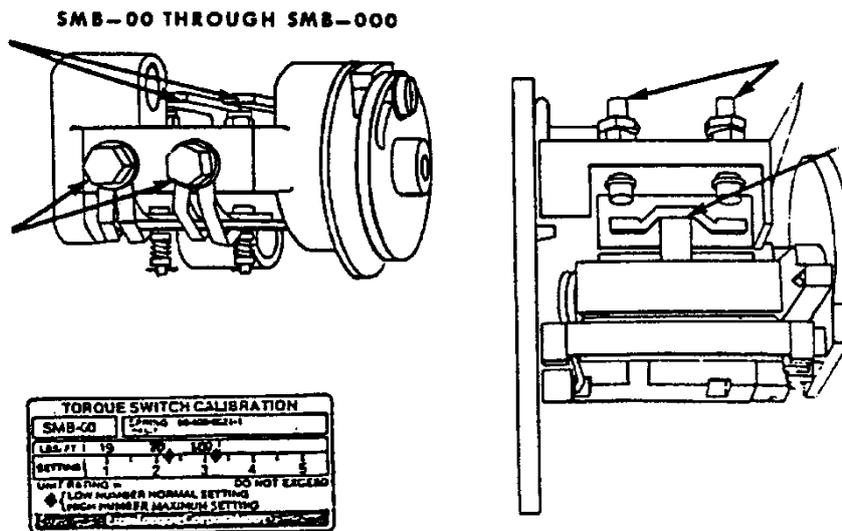
- Comprobar la continuidad del relé de sobrecarga, sustituyendolo si está defectuoso.
- Utilizar un voltímetro con una escala de ohmios o un puente de resistencias. Medir y registrar la impedancia de fase.
- Si con las medidas anteriores no se ha detectado el origen del problema, con la ayuda de los CWDs comprobar el estado de los fusibles, contactores o interruptores.
- Reparar o sustituir los componentes defectuosos del sistema de control del motor.

A.1.5. Comprobación de los interruptores de par

Los interruptores de par deben someterse a las siguientes comprobaciones:

- a) Identificar y localizar los contactos de los interruptores de par. Ver Figure 32.

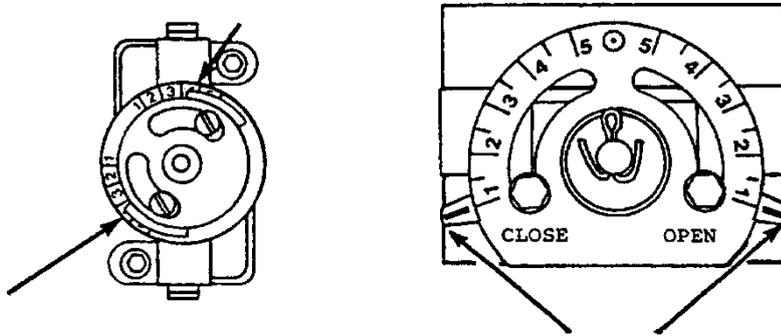
Figure 32 : Identificación de los interruptores de par



Fuente 37 : Limitorque.

- b) Inspeccionar visualmente los interruptores, localizando señales de fuego, sobrecalentamiento o desgaste.
- c) Cerrar manualmente la válvula hasta que asienten.
- d) Verificar que todos los contactos de interruptores de par están cerrados. Si esto no sucediese, los interruptores de par son defectuosos o están instalados de una forma inadecuada. Repararlos o reemplazarlos, según sea necesario.
- e) Con ayuda de los CWDs determinar el tarado correcto de los interruptores de par. Si no se especifica ninguno en los CWDs, localizar la placa de identificación en la carcasa del actuador, ver Figure 32. En esta placa se indica los valores normales (marca menor) y máximo (marca mayor) recomendados por el fabricante.
- f) Anotar el tarado “normal” del interruptor de par.
- g) Comprobar el valor actual del limitador de par y anotarla. Ver Figure 33.

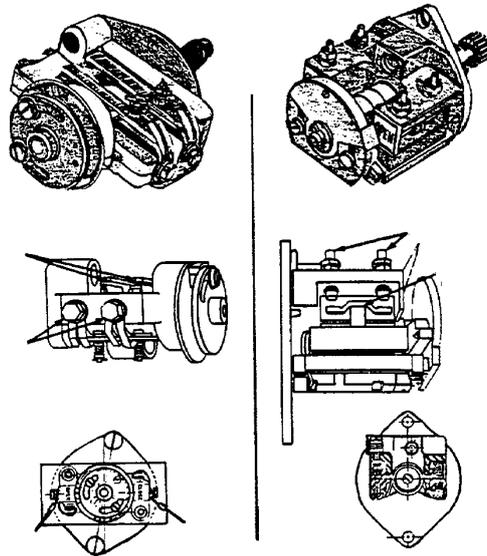
Figure 33 : Medida del valor actual del limitador de par



Fuente 38: Limitorque

- h) Comprobación de los contactos de los interruptores de par.
- i) Cerrar suavemente la válvula hasta que asiente.
- j) Con un destornillador aislado o una sonda de pruebas, abrir el contacto "OPEN" del interruptor de par ver Figure 34, mientras se intenta abrir eléctricamente la válvula. Verificar que el motor no gira cuando los contactos están abiertos o que los interruptores de par no se utilizan para la protección del motor, lo que puede comprobarse en los CWDs.

Figure 34 : Comprobación de los contactos de los interruptores de par



Fuente 39 : Limitorque

- k) Repetir el paso anterior con el contacto "CLOSE".
- l) Comprobar que el compartimento de los interruptores y especialmente los puntos y empaquetaduras se encuentran en buenas condiciones. En caso de que no sea así, reparar o sustituir los puntos, carcasa, etc.
- m) Instalar o cerrar la cubierta del compartimento de los interruptores.

A.1.6. Ajustes de los interruptores de par

Si en la comprobación de los interruptores de par se detectaran discrepancias entre el valor de tarado real y el previsto, se deberá proceder al ajuste del mismo.

Este ajuste debe realizarse con pequeños incrementos, manteniendo el fluido del sistema en sus condiciones normales de presión y temperatura.

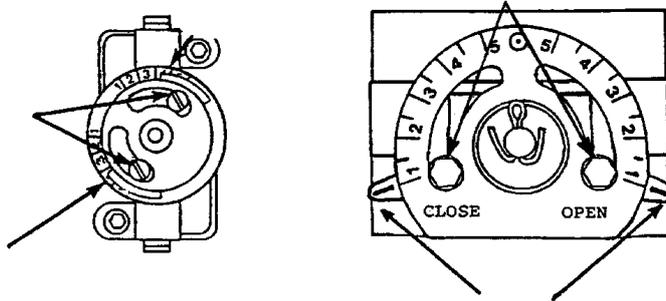
Antes de realizar el ajuste debe tenerse en cuenta que los actuadores vienen ajustados de fábrica, aun cuando en algunos casos puedan requerir pequeños ajustes en su instalación inicial para adecuarse a los parámetros de diseño. En ningún caso debe cambiarse el tarado arbitrariamente.

En ocasiones el actuador no es capaz de cerrar las válvulas debido al limitador de par. En estos casos, antes de modificar el tarado, deben comprobarse que las empaquetaduras no están excesivamente apretadas y que el vástago no está doblado ni agarrotado, moviéndose libremente.

Secuencia de comprobación:

- a) Mantener la palanca auto-manual elevada en posición normal y re-energizar el motor y el circuito de control.
- b) Mover manualmente la válvula hasta la posición intermedia.
- c) Ajustar el tarado a su valor mínimo, o si se está seguro de que el tarado actual es demasiado bajo, elevarlo al incremento mínimo posible. Los tarados de apertura "OPEN" y cierre "CLOSE" se ajustan de la misma forma. Ver Figure 35
 - Para los actuadores tipo SMB-00 y SMB-000, aflojar los tornillos y ajustar el borde de resalte (STRIKER) al par requerido.
 - Para los actuadores tipo SMB-X, aflojar los tornillos de ajuste y mover los indicadores (POINTER) al par requerido.
- d) Mientras se observa el interruptor de par, operar eléctricamente la válvula en la dirección deseada.
- e) Pasar el actuador a modo manual y con el volante comprobar que la válvula está completamente cerrada.
- f) Si se requiere un ajuste mayor, volver al paso "c".
- g) Anotar el nuevo tarado.

Figure 35 : Ajuste de los interruptores de par



Fuente 40 : Limitorque

A.1.7. Esquemas eléctricos

En la Figure 36, se representa un esquema general eléctrico para la operación del actuador de una válvula motorizada.

En la parte superior de la figura se encuentra el circuito de fuerza para alimentación eléctrica del motor con el circuito de inversión para apertura/cierre y el relé térmico de protección contra sobre intensidad.

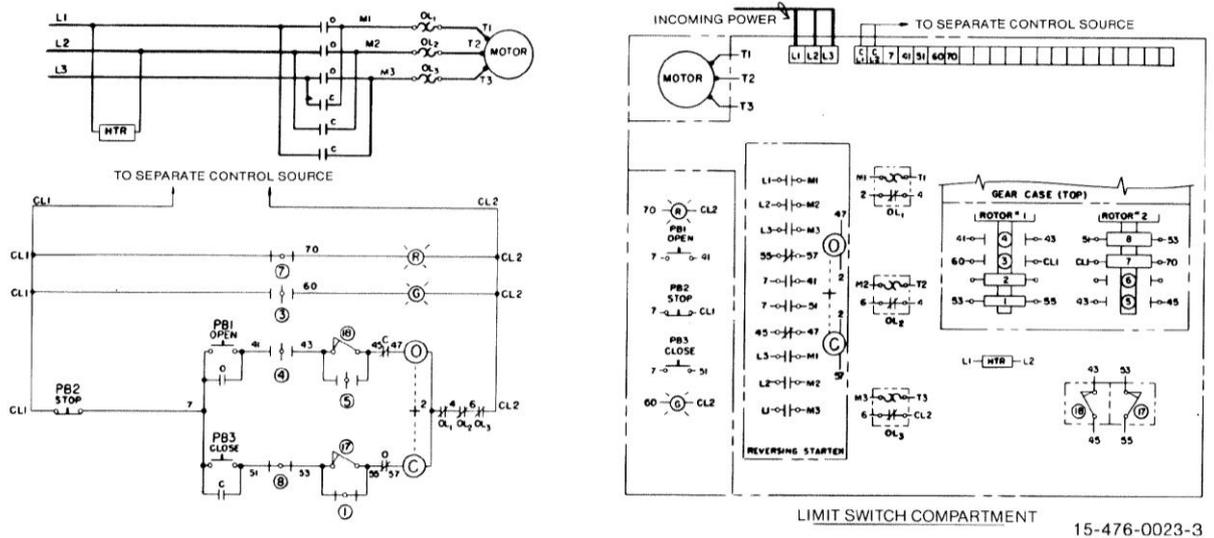
En la parte baja de la figura se encuentra el circuito de señalización y control. La señalización corresponde a las luces roja ® y verde (G). El circuito de control corresponde a los contactos de los finales de carrera y a los limitadores de par

Figure 36 : Esquema general eléctrico

TYPICAL WIRING DIAGRAMS

Legend:

- C—CLOSE CONTACT
- O—OPEN CONTACT
- (C)—CLOSING COIL
- (O)—OPENING COIL
- (G)—GREEN INDICATING LIGHT
- (R)—RED INDICATING LIGHT
- PB1—OPEN PUSHBUTTON
- PB2—STOP PUSHBUTTON
- PB3—CLOSE PUSHBUTTON
- OL—OVERLOAD RELAY (1,2,8,3)
- HTR—SPACE HEATER (LS COMP)
- +—MECHANICAL INTERLOCK



15-476-0023-3

VALVE SHOWN IN FULL OPEN POSITION

ROTOR	CONTACT	LIMIT SWITCH COMPARTMENT		FUNCTION
		FULL OPEN	FULL CLOSED	
1	1	—	—	BY PASS CIR
	2	—	—	SPARE
	3	—	—	IND. LIGHT
	4	—	—	OPEN LIMIT
2	5	—	—	BY PASS CIR
	6	—	—	SPARE
	7	—	—	IND. LIGHT
	8	—	—	CLOSE LIMIT

NOTES
 1 — CLOSED CONTACT
 2 --- OPEN CONTACT

- (17) CLOSING TORQUE SWITCH INTERRUPTS CONTROL CIRCUIT IF MECHANICAL OVERLOAD OCCURS DURING CLOSING CYCLE.
- (18) OPENING TORQUE SWITCH INTERRUPTS CONTROL CIRCUIT IF MECHANICAL OVERLOAD OCCURS DURING OPENING CYCLE.

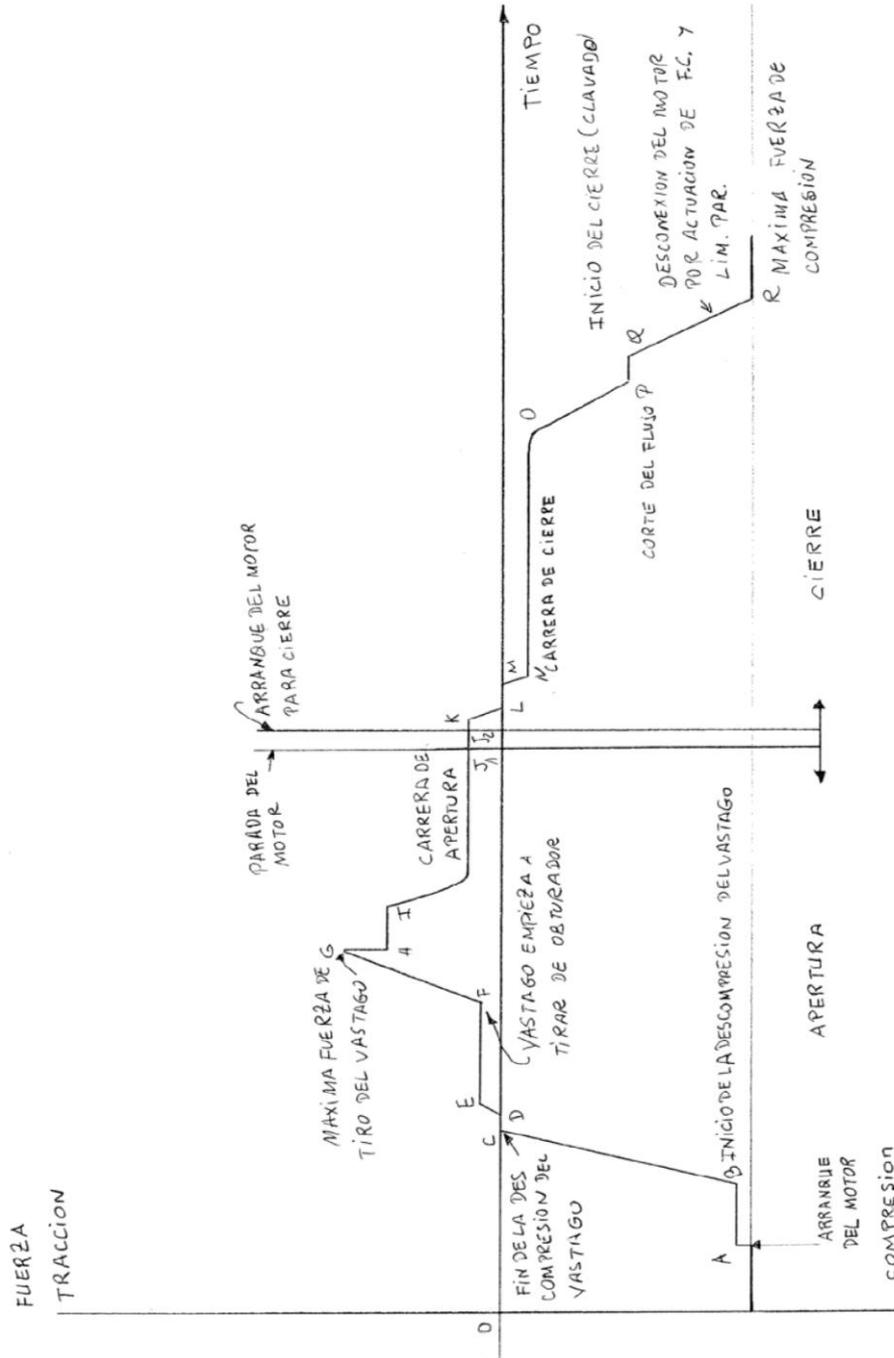
Fuente 41 : Limitorque

A.1.8. Diagrama típico de una curva Esfuerzo-Tiempo

En la Figure 37, se representa una curva típica de una válvula sin ningún tipo de mal función, en una operación completa de apertura-cierre, donde se muestran todos los estados por los que pasa la válvula durante el recorrido del obturador.

- AB Zona de absorción de holguras y carrera de golpeo en apertura
- CD Zona de absorción de holgura tuerca-vástago (compresión → tracción)
- EF Zona de absorción de holgura vástago-obturador
- FG Zona de despegue del obturador (esta fuerza es muy variable en función del tipo de válvula, globo compuerta, etc.
- HI Se produce el despegue y la fuerza se reduce
- J₂K Zona de absorción de holguras y carrera de golpeo en cierre
- LM Zona de absorción de holgura tuerca-vástago (tracción → compresión)
- OP Incremento de la carga por estrangulación del flujo

Figure 37 : Curva esfuerzo-tiempo



Fuente 42 : Tecnatom

ANEXO 2 HOJAS DE DATOS E INFORMES DE DIAGNOSIS

En este anexo se adjuntan las referencias de los documentos editados por el EPRI referidos al cálculo de esfuerzos en el eje de la válvula, la Hoja de Datos de Ingeniería y el Informe de la diagnosis estática realizada en una MOV con válvula de compuerta.

A.2.1. Metodología de cálculo de los esfuerzos en el eje de la válvula

Tal como se menciona en el apartado 2.5.7, los documentos de referencia para el cálculo de esfuerzos en el eje de la válvula son:

- Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants TR-106563-V1 Gate and Globe valves.[43]
- Application Guide for Motor-Operated Valves in Nuclear Power Plants TR-106563-V2 Butterfly valves.[15]

A.2.2. Hoja de Datos de Ingeniería

En dicho documento de Ingeniería se establecen los criterios requeridos de aceptación, los criterios de referencia, así como las características técnicas del vástago de la válvula y el tipo de paquete de muelles que monta su actuador.

Aparecen los valores requeridos de la válvula motorizada siguientes:

- Empuje de cierre
- Empuje de apertura
- Par de cierre
- COF del vástago
- Ajuste de interruptores

Los criterios de referencia de la válvula motorizada siguientes:

- Empuje en operación normal
- Corriente nominal del motor
- Carga de la empaquetadura
- Factor del vástago
- Ajuste del imitador de par recomendado
- Capacidad máxima del banco

También aparecen el Análisis cualitativo y otros datos de interés.

Figure 38 : Hoja datos MOV de compuerta

Ventana de Ajuste - HOJA DE CAMPO			
VÁLVULA DE COMPUERTA			
TAG:	2VCND115D		Rev. 1
CRITERIOS REQUERIDOS DE LA VÁLVULA MOTORIZADA			
EMPUJE DE CIERRE	Mín. Requerido C11-C14	≥	5815,27 lb
	Máx. Permitido C3-C16	≤	18869,69 lb
EMPUJE DE APERTURA	Máx. Empuje Desasiento O9	≤	6631,04 lb
PAR DE CIERRE	Máx. Permitido C3-C14	≤	195,10 lb.ft
	Máx. Permitido C3-C16	≤	208,00 lb.ft
COF DE VÁSTAGO	Máx. COF Cierre	≤	N/A
	Máx. COF Apertura	≤	0,4914
AJUSTE INTERRUPTORES	Mín. By-Pass Apertura	≥	40 %
	Máx. By-Pass Apertura	≤	60 %
	Lógica de Cierre		LP_C
CRITERIOS REFERENCIA DE LA VÁLVULA MOTORIZADA			
EMPUJE - OPERACIÓN NORMAL	Máx. Permitido C3-C16	≤	18869,69 lb
	Máx. Empuje Desasiento O9	≤	6631,04 lb
CORRIENTE NOMINAL MOTOR	Máx. in Motor	≤	3,1 A
CARGA DE EMPAQUETADURA	Rango Valor Medio		1000 ± 1800 lb
FACTOR DE VÁSTAGO	Esperado (COF 0,06 + 0,15 μ)		0,01177 ± 0,01632 ft
AJUSTE LIMITADOR DE PAR RECOMENDADO	Apertura	+	60,24 ± 250 lb.ft
	Cierre	+	N/A ± 195,10 lb.ft
CAPACIDAD MÁXIMA EN BANCO	Máx. Permitido	≤	195,10 lb.ft
ANÁLISIS CUALITATIVO			
TRAZAS	Se debe reportar a DST cualquier anomalía observada en lo traza de las distintas variables a monitorear		
DATOS DE INTERÉS			
VÁSTAGO DE LA VÁLVULA	Diámetro: 1,25	Paso: 0,333	Avance: 0,666 Material: SA-564 Gr.630 H-1100
TIPO DE PAQUETE DE MUELLES	60 600-0049		
REP. DEL CÁLCULO:	Anexo I	PST-111	Rev.1

Fuente 43 : ANAV

A 2.2. Informe de Diagnóstico de Tecnatom

En el informe de resultados de la diagnóstico además de la hoja resumen de resultados As-Found ver Figure 39 y As-Left ver Figure 40, donde aparecen los tiempos de apertura y cierre, valores de esfuerzo y par, y los comentarios o recomendaciones del ingeniero de campo, también se adjuntan en otras hojas complementarias del informe las gráficas de resultados y las curvas para su interpretación.

Figure 39: Informe diagnóstico AS FOUND de MOV de compuerta




Static Test Data Sheet for Rising Stem Valves

MOV ID Number: VALVULA 1

AS FOUND CLOSING		File Log No: 173103011113	Date: 06/11/17	Time: 01:34:23 pm
	Zero Ref. (c3)	CST (c14)	Max Total (c16)	Avg. Run (c4-c5)
Time *	2.413	11.694	11.757	
Thrust	0.0000000	-9.256	-9.966	-1.212
Torque	0.0000000	-142,1	-156,5	-16,69
				Close TSS: 3
				**Stroke Time (c8-c9): NA
AS FOUND OPENING		File Log No: 173103011113	Date: 06/11/17	Time: 01:34:23 pm
	Zero Ref. (o4)	Pull Out (o9)	Avg. Run (o13-o14)	
Time *	16,849	16,973		
Thrust	-30,41	4,065	1,471	
Torque	1,376	46,57	23,47	
				Open TSS: 2,5
				**Stroke Time (o11-o15): NA
				Stem Factor: 0,01535
				Stem Factor: 0,01146

* Time reference relative to the first point on far left of screen
 ** Stroke time is measured between light indication.

Supplemental Data:

Dynamic test signatures

Observed anomalies

Special condition of test

Records of any maintenance

Problems present during test

Summary

Comments:

DIAGNOSIS AS FOUND

El desplazamiento del paquete de muelles se encuentra en su ajuste máximo, en caso de requerir más empuje se recomienda sustituir por el siguiente model más duro, el 0049.

Todos los valores registrados se encuentran dentro de los criterios de la ventana de ajuste.

Performed By: _____ Date: _____

Signature

Verified By: _____ Date: _____

Signature

C:\Users\2303...173103011113.C00
QLReportStandard 2013.274
CPU3616.2303
Page 1 of 1
15/03/2018 10:42:59

Fuente 44 : Tecnatom

Figure 40 : Informe diagnosis AS LEFT de MOV de compuerta



Static Test Data Sheet for Rising Stem Valves

MOV ID Number: VALVULA 1

AS LEFT CLOSING		File Log No: 173123011136		Date: 08/11/17	Time: 12:49:28 pm
	Zero Ref. (c3)	CST (c14)	Max Total (c16)	Avg. Run (c4-c5)	Close TSS: 3
Time *	2,339	11,726	11,784		**Stroke Time (c6-c8) NA
Thrust	0,000000	-8,285	-8,867	-1,143	Stem Factor
Torque	0,000000	-133,9	-140,4	-17,42	0,01616
AS LEFT OPENING		File Log No: 173123011136		Date: 08/11/17	Time: 12:49:28 pm
	Zero Ref. (o4)	Pull Out (o9)	Avg. Run (o13-o14)		Open TSS: 3
Time *	14,875	14,964			**Stroke Time (o11-o15) NA
Thrust	-20,66	3,936	1,432		Stem Factor
Torque	0,8309	44,04	22,66		0,01119
* Time reference relative to the first point on far left of screen					
** Stroke time is measured between light indication.					

Supplemental Data:

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Dynamic test signatures | <input type="checkbox"/> Observed anomalies |
| <input type="checkbox"/> Special condition of test | <input type="checkbox"/> Records of any maintenance |
| <input type="checkbox"/> Problems present during test | <input type="checkbox"/> Summary |

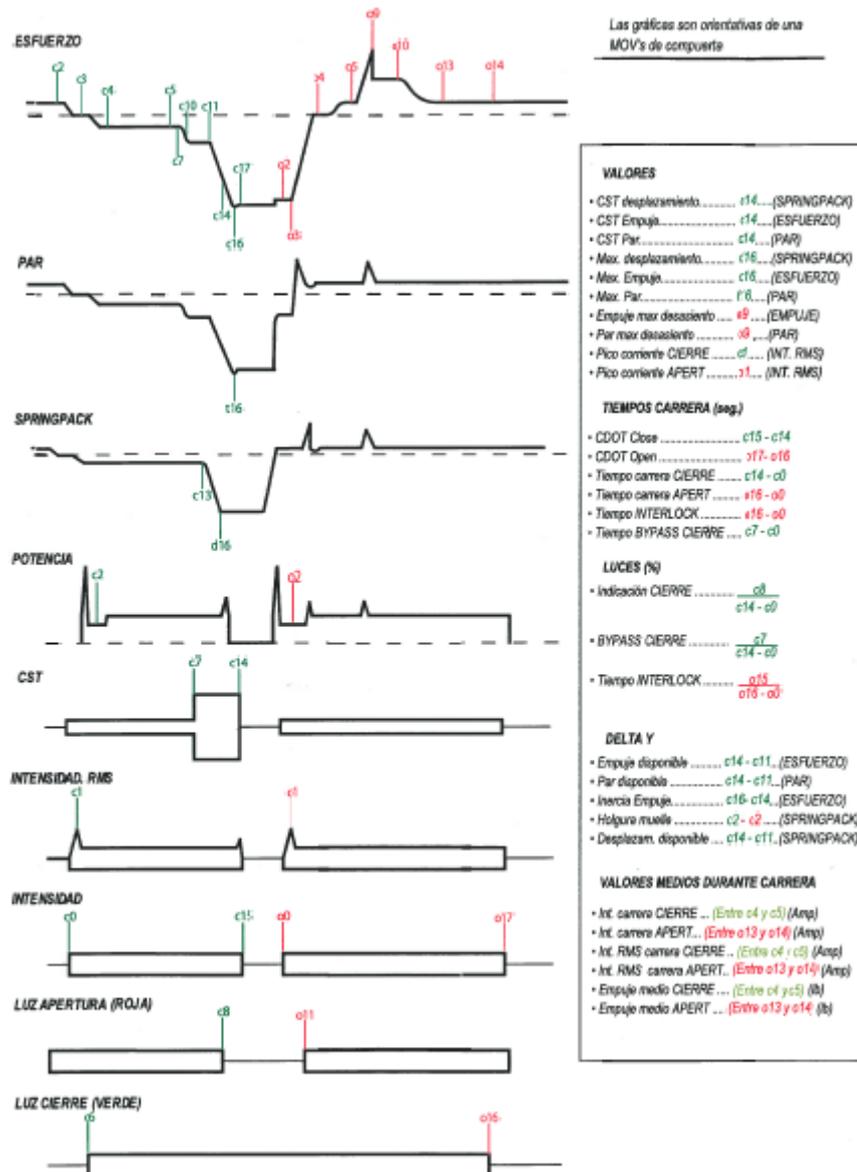
Comments:

DIAGNOSIS AS LEFT
Tras mantenimiento del actuador.
Todos los valores registrados se encuentran dentro de los criterios de la ventana de ajuste.

Performed By: _____ Date: _____
Signature

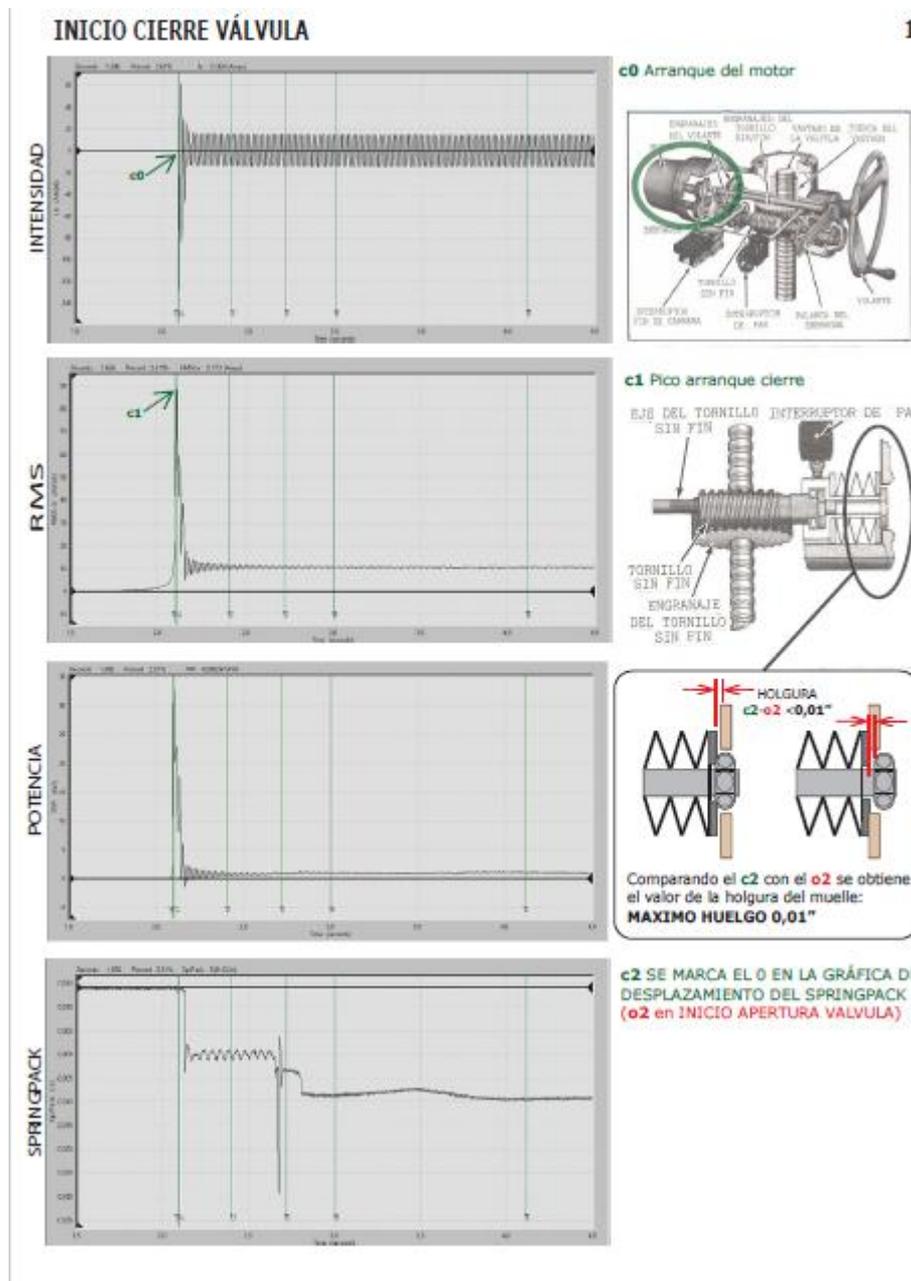
Verified By: _____ Date: _____
Signature

Figure 41 : Gráficas orientativas para la interpretación de las curvas de diagnóstico de una MOV de compuerta



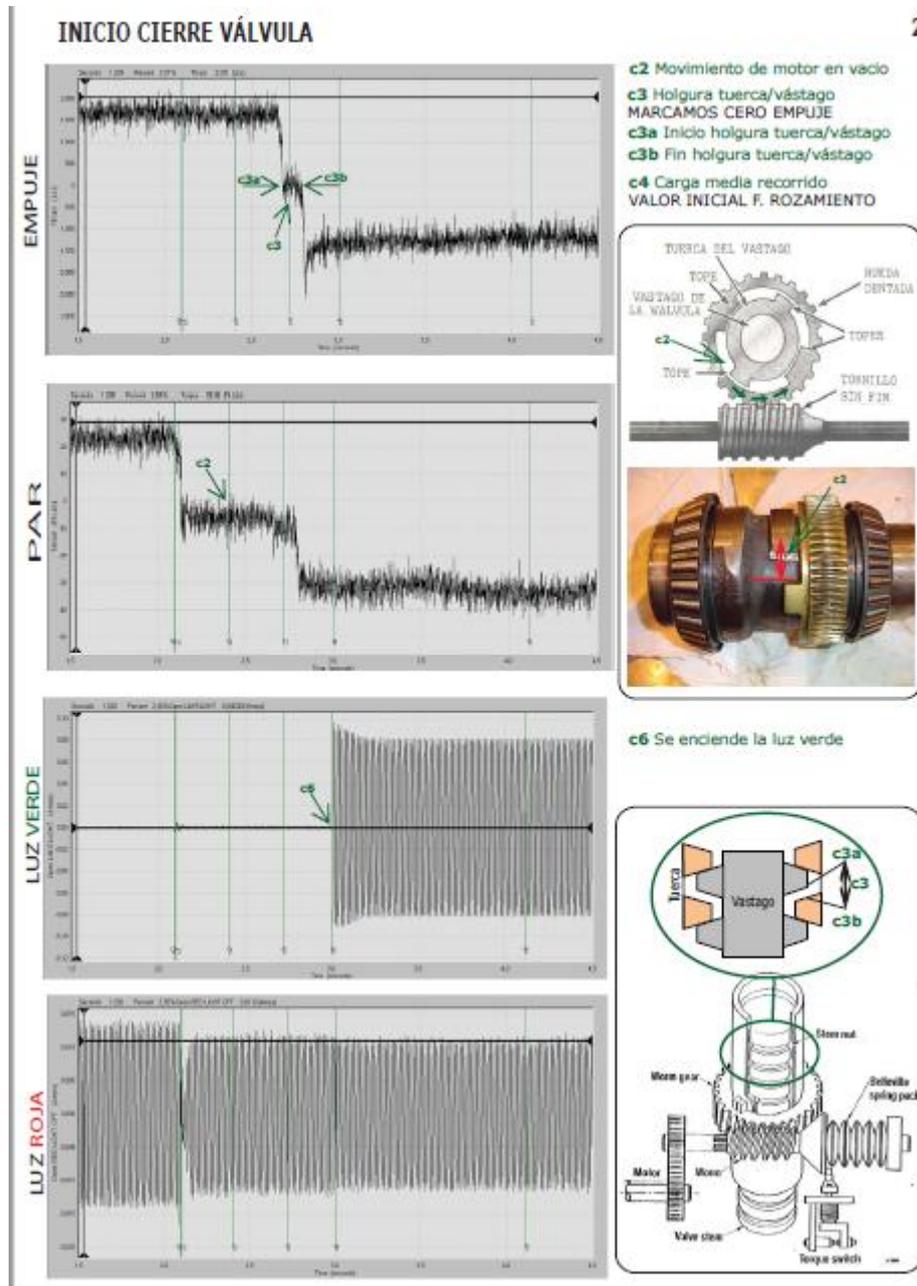
Fuente 46 : Tecnomat

Figure 42 : Valores eléctricos respecto de la posición SpringPack



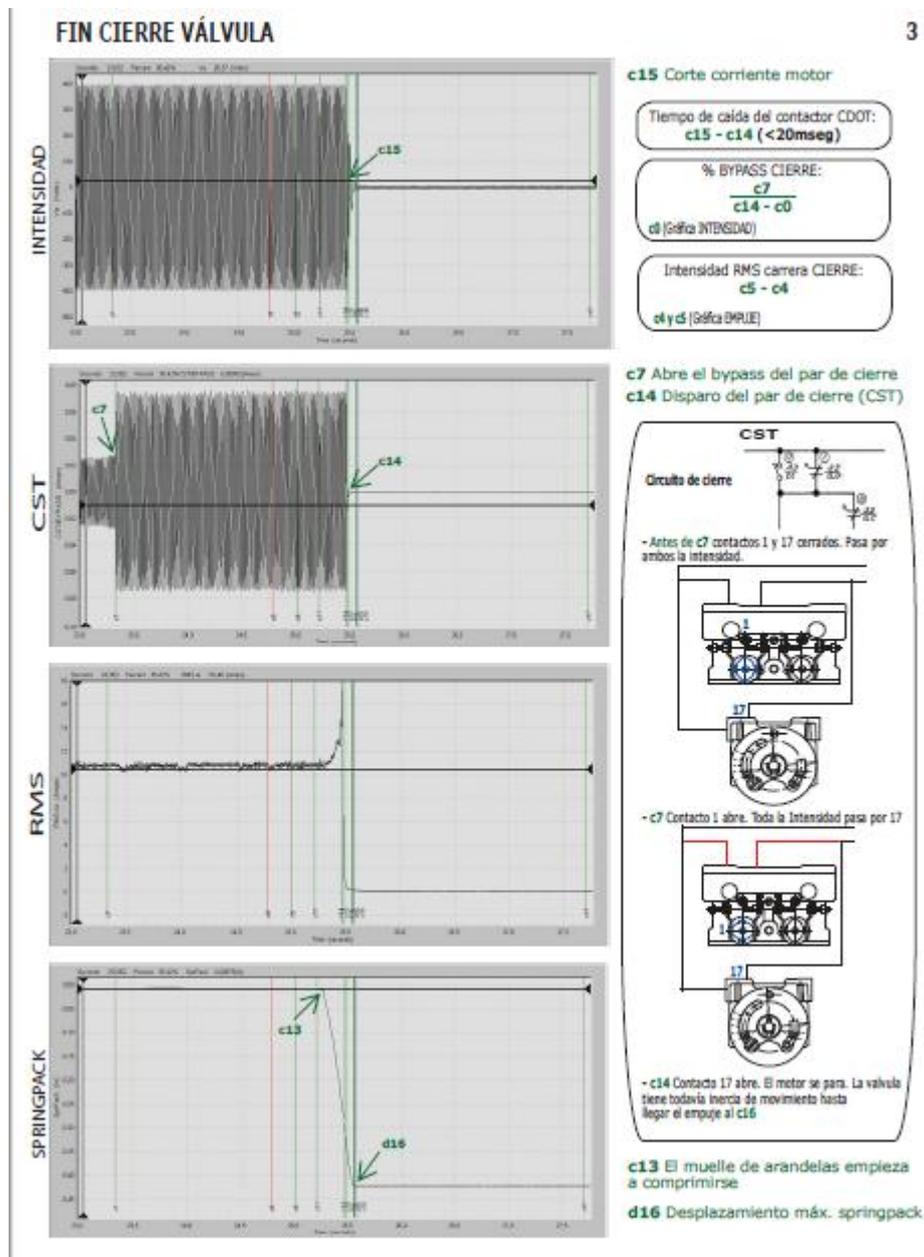
Fuente 47 : Tecnomat

Figure 43 : Valores de empuje y par e indicadores posición



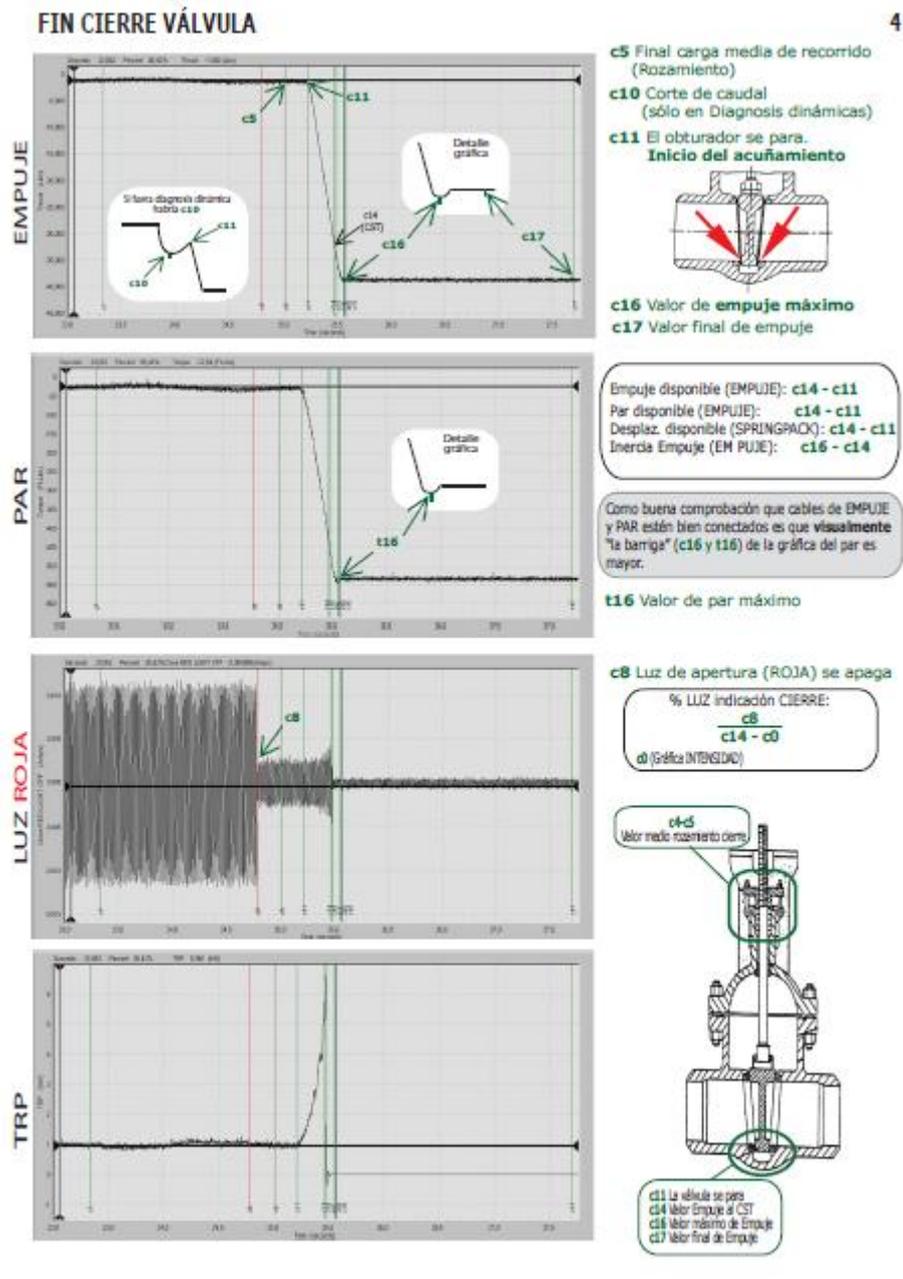
Fuente 48 : Tecnatom

Figure 44 : Valores eléctricos y CST respecto Springpack



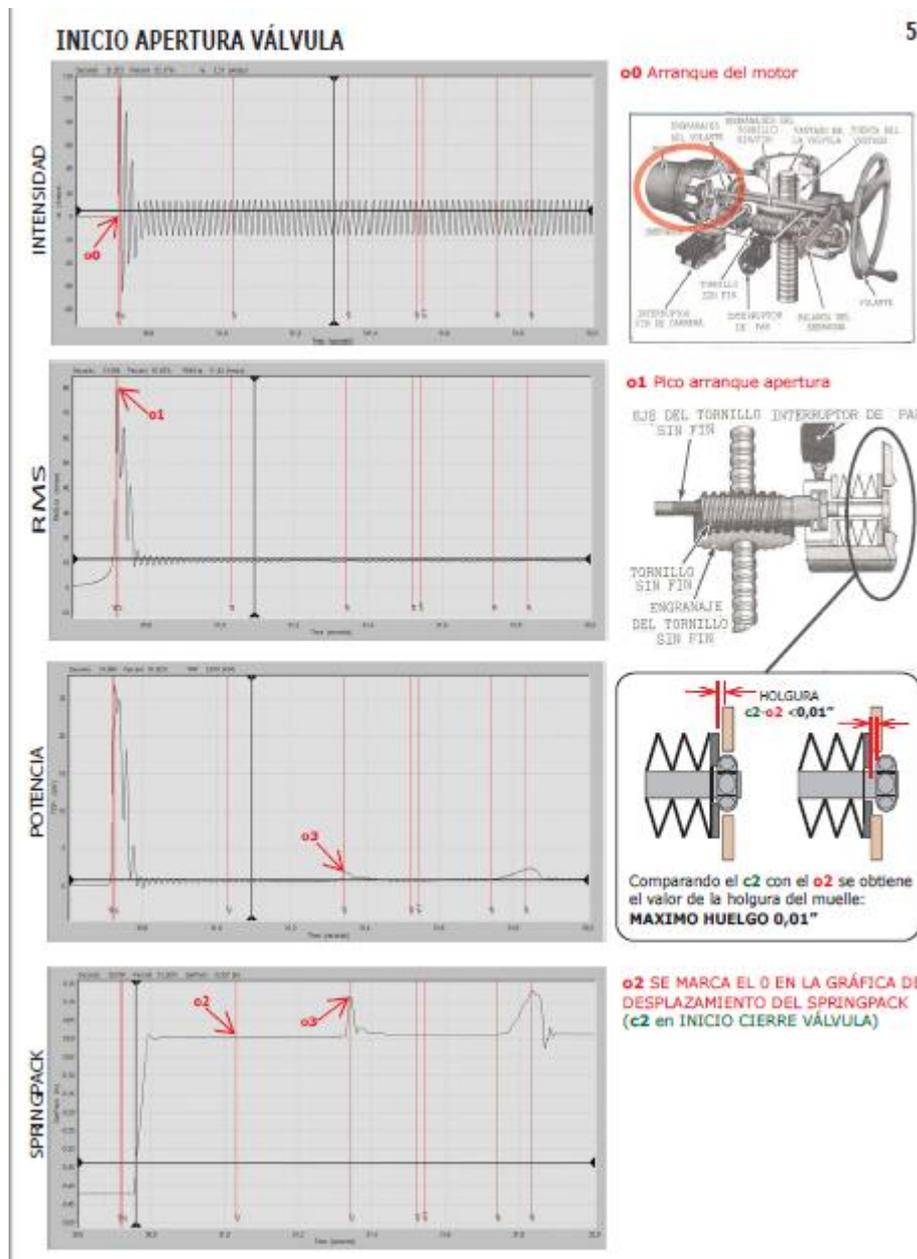
Fuente 49 : Tecnatom

Figure 45 : Valores empuje y par, luz posición y TRP



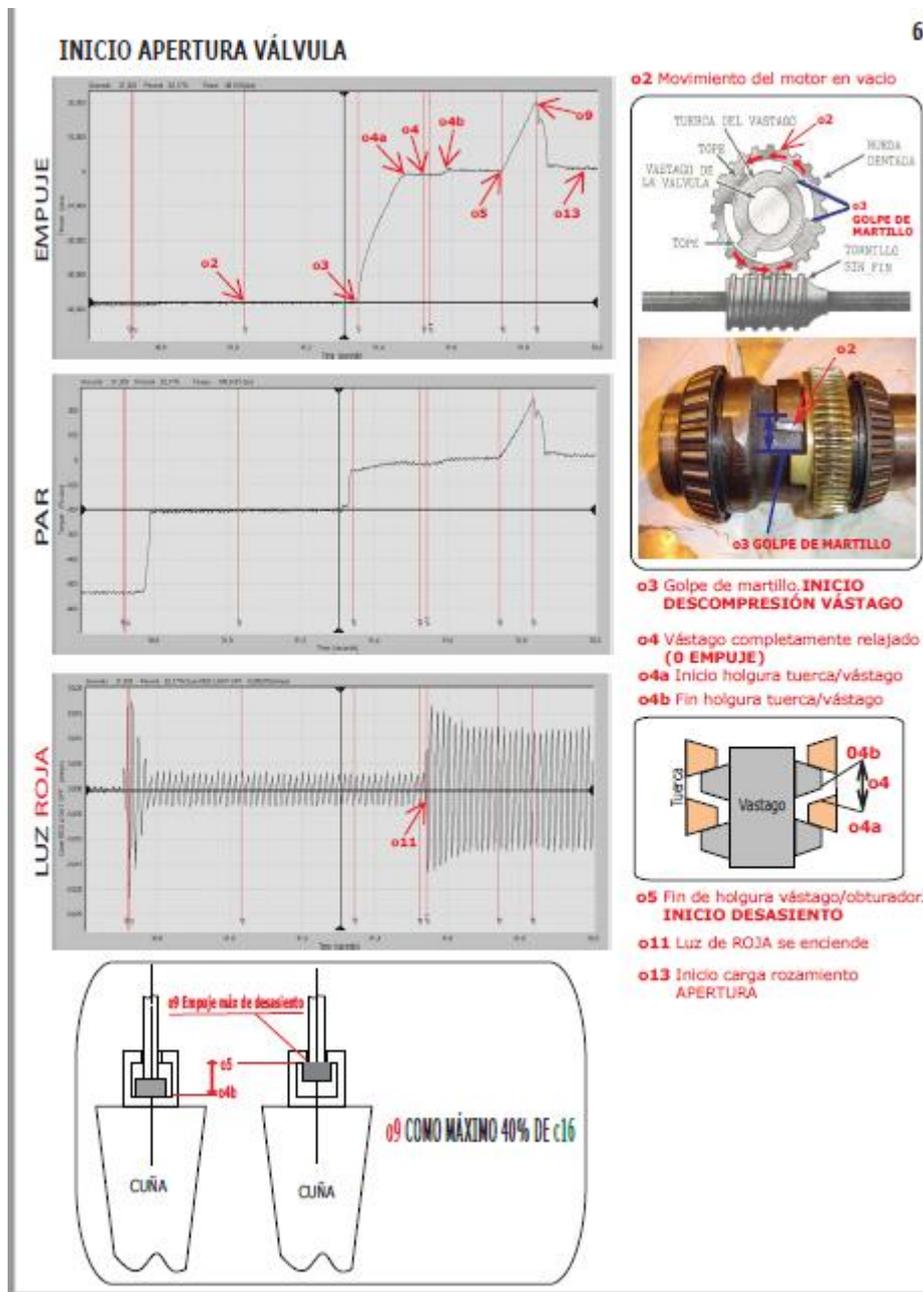
Fuente 50 : Tecnomat

Figure 46 : Valores eléctricos respecto de la posición SpringPack



Fuente 51 : Tecnatom

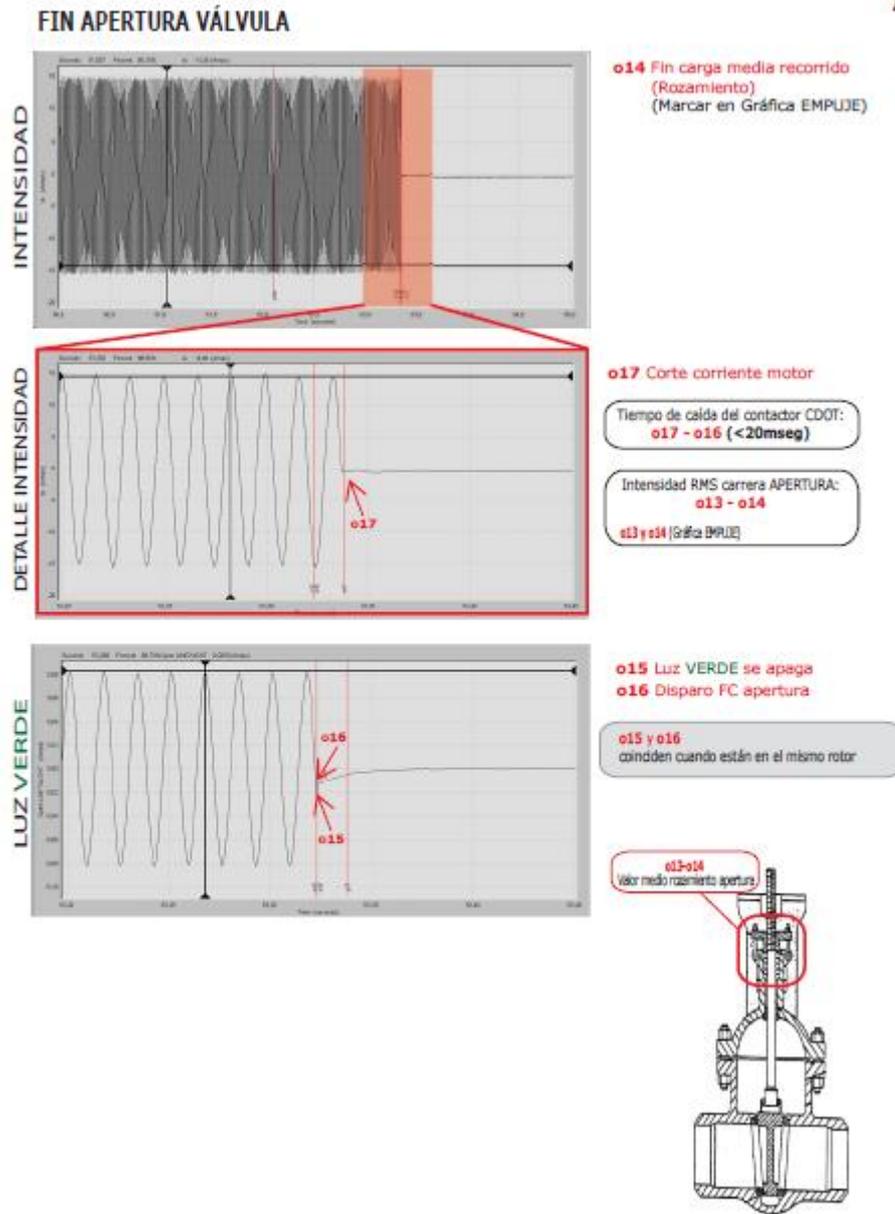
Figure 47 : Valores empuje, par y luz indicación



Fuente 52 : Tecnatom

Figure 48 : Valores intensidad y luz indicación verde

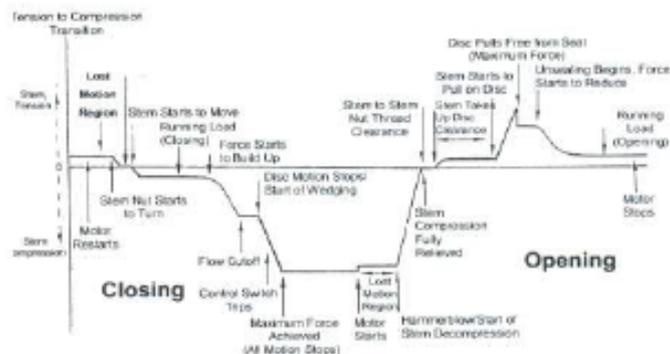
7



Fuente 53 : Tecnomat

Figure 49 : Marcadores posición respecto a curva completa de cierre y apertura

MARCADOR		GRÁFICA
c1	Inrush Current Peak	Pico de arranque cierre
c1	Inrush Current Peak	Pico de arranque apertura
c0	Motor Start	Arranque del motor
c0	Motor Start	Arranque del motor
c15	Motor Current Cutoff	Corta corriente motor
c17	Motor Current Cutoff	Corta corriente motor
C7	Close Torque Bypass Switch Opens	Abre el bypass del par de cierre
C14	Close Torque Switch Opens (or CST)	Disparo del par de cierre (CST)
Racer 0 en la gráfica de empuje (Thrust)		THRUST (Empuje)
e16	Maximum Torque Value	Valor de Par máximo
c5	Close Indicator Light On (green)	Luz de cierre se enciende (verde)
c16	Close Indicator Light Off (green)	Luz de cierre se apaga (verde)
a8	Open Indicator Light Off (red)	Luz de apertura se apaga (rojo)
a11	Open Indicator Light On (red)	Luz de apertura se enciende (rojo)
c2	Lost Motion Region (near middle)	Movimiento motor en vacío (zona media)
a2	Lost Motion Region (near middle)	Movimiento motor en vacío (zona media)
a9	Open Torque Bypass Switch Closes	Cierra el bypass del par de apertura
a6	Open Torque Switch Opens	Disparo del interruptor de par de apertura
a12	Open Torque Bypass Switch Opens	Apertura del bypass del par de apertura
p0		Stem Motion Begins
c3a	Thread Transition Start	Inicio de holgura de tuerca/vástago
c3b	Thread Transition End	Fin de holgura de tuerca/vástago
a4	Closing Running Condition (near beginning)	Cargas medias en recorrido (cerca del principio)
c5	Closing Running Condition (near end)	Cargas medias en recorrido (cerca del final)
c10	Flow Cutoff	Corte de caudal (cuando lo hay)
c11	Disc Motion Stops/Start of Wedging	El obturador se para/inicio del aculeamiento
c16	Maximum Thrust Value	Valor de empuje máximo
c17	Final Thrust Value	Valor final de empuje
a4a	Thread Transition Start	Inicio de holgura de tuerca/vástago
a4b	Thread Transition End	Fin de holgura de tuerca/vástago
a5	Stem Takes up Disc Clearance	Inicio de holgura de vástago-obturador (Inicio desajuste)
a9	Maximum Force at Disc Pullout	Empuje máximo en desajuste
a10	Force Right After Disc Pullout with DP	Empuje justo después del desajuste (con DP)
a13	Opening Running Condition (near beginning)	Cargas medias en recorrido (cerca del principio)
a14	Opening Running Condition (near end)	Cargas medias en recorrido (cerca del final)
a18	Final Force Value	Empuje final
a19	Backseating Force	Empuje en contrasentido
ap1	Open Packing Load	Rozamiento en empaquetadura en apertura
ap1	Close Packing Load	Rozamiento en empaquetadura en cierre
a3	Transition to Compression Transition	Transición de compresión (0 del empuje)
f1	Flow Initiation	Inicio de paso de caudal (si lo hay)
f1	Flow Cutoff	Corte de caudal (cuando lo hay)
mf1	Maximum Thrust at Flow Initiation	Empuje máximo al inicio de caudal (si lo hay)
mf1	Maximum Thrust at Flow Cutoff	Empuje máximo al corte de caudal (si lo hay)
c13	Spring Pack Starts to Compress	El muelle de arandelas empieza a comprimirse
a3	Hammerblow/Start of Stem Decompression	Golpe martillo/inicio de compresión vástago
a4	Stem Compression Fully Relieved	Vástago completamente relajado (0 del empuje)
d16	Maximum Spring Pack Displacement	Desplazamiento máximo del muelle de arandelas
c12	Motor Stalls	Motor con rotor bloqueado
a7	Motor Stalls	Motor con rotor bloqueado
a8	Thermal Overload Switch Trips	Disparo del térmico del motor
a16	Open Limit Switch Opens	Disparo del final de carrera de apertura
vo1	Open Calibration Beginning	Inicio de calibración en apertura
vo2	Open Calibration End	Fin de calibración en apertura
vc1	Close Calibration Beginning	Inicio de calibración de cierre
vc2	Close Calibration End	Fin de calibración de cierre
am	Open / Close Calibration Separation	Separación entre la apertura y cierre



Fuente 54: Tecnomat

ANEXO 3 PUBLICACIONES Y PONENCIAS

A.3.1. Towards New Technology in Valve Maintenance

Autores: Ángel Varela, Eduard Montseny, Ramón Grau

Congreso: 7th International Conference on Maritime Transport

Fecha: 29 Junio 2016 en Barcelona

A.3.2. Innovación y Transferencia Tecnológica en Ingeniería Mantenimiento de Válvulas

Autor: Ángel Varela Geis

Congreso: 43 Reunión anual de la Sociedad Nuclear Española

Ponencia 33-08 Sesión Técnica 33-Mantenimiento, Inspección y Pruebas.

Fecha: 4-6 Octubre 2017 en Málaga