

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**DEPARTAMENTO DE PROYECTOS DE INGENIERÍA**



**MEJORA DE METODOLOGÍA RCM A PARTIR DEL AMFEC E  
IMPLANTACIÓN DE  
MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO EN PLANTAS  
DE PROCESOS**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada por:  
D. Marc Gardella González

Dirigida por:  
D. Dr. Luis José Amendola



---

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	11
<b>1 RESUMEN</b> .....	13
<b>2 INTRODUCCIÓN</b> .....	25
<b>2.1 OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL</b> .....	26
<b>2.2 HIPÓTESIS</b> .....	27
<b>2.3 APORTACIONES Y CONTENIDO POR CAPÍTULOS DE LA TESIS DOCTORAL</b> .....	28
<b>2.4 DEFINICIONES</b> .....	30
<b>2.5 DEFINICIÓN DE NECESIDAD</b> .....	37
<b>2.6 RESEÑAS HISTÓRICAS DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL</b> .....	38
<b>2.6.1 ANTIGUAS CIVILIZACIONES</b> .....	38
<b>2.6.2 REVOLUCIÓN INDUSTRIAL</b> .....	38
<b>2.6.3 DÉCADAS 40 Y 50</b> .....	39
<b>2.6.4 INICIOS DEL TPM EN DÉCADA DE LOS 50 (INDUSTRIA MANUFACTURERA)</b> .....	39
<b>2.6.5 CREACIÓN DE TPM EN DÉCADAS DE LOS 60 Y 70 (INDUSTRIA MANUFACTURERA)</b> .....	40
<b>2.6.6 TEROTECNOLOGÍA, DÉCADA DE LOS 60</b> .....	40
<b>2.6.7 MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO DÉCADAS 50, 60 Y 70 (INDUSTRIA DE PROCESOS)</b> .....	40
<b>2.6.8 INTRODUCCIÓN DEL GMAO DÉCADA DE LOS 80</b> .....	41
<b>2.6.9 RCM, INICIO EN DÉCADA DE LOS 70</b> .....	41
<b>2.6.10 ACTUALIDAD</b> .....	42
<b>3 ESTADO DEL ARTE</b> .....	45
<b>3.1 OBJETIVOS</b> .....	45

---

<b>3.2 RCM ((RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE) MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA FIABILIDAD))</b> .....	46
<b>3.2.1 CÁLCULO DE CRITICIDADES</b> .....	47
<b>3.2.2 AMFEC (ANÁLISIS DE MODOS DE FALLOS EFECTOS Y CRITICIDAD)</b> .....	47
<b>3.2.3 NPR (NÚMERO DEL PONDERACIÓN DEL RIESGO)</b> .....	48
<b>3.3 MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO</b> .....	49
<b>3.3.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO</b> .....	49
<b>3.3.2 MANTENIMIENTO PREDICTIVO</b> .....	49
<b>3.4 KPI's (KEY PERFORMANCE INDICATORS). INDICADORES DE GESTIÓN</b> .....	50
<b>3.5 TPM (TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE (MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL))</b> .....	51
<b>3.6 LCC (LIFE CYCLE COST (COSTE DEL CICLO DE VIDA))</b> .....	51
<b>3.7 PUBLICACIONES AUTOR TESIS</b> .....	52
<b>3.8 CONCLUSIONES</b> .....	54
<b>4 DEFINICIÓN DEL MÉTODO RCM EN LA ACTUALIDAD</b> .....	55
<b>4.1 OBJETIVOS</b> .....	55
<b>4.2 INTRODUCCIÓN</b> .....	56
<b>4.3 LAS 7 PREGUNTAS BÁSICAS PARA LA IMPLANTACIÓN DE RCM [JOHN MOUBRAY]</b> .....	57
<b>4.3.1 FUNCIONES Y ESTÁNDARES DE FUNCIONAMIENTO EN LA UBICACIÓN OPERATIVA</b> .....	58
<b>4.3.2 FALLOS FUNCIONALES</b> .....	60
<b>4.3.3 MODOS DE FALLOS</b> .....	62
<b>4.3.4 EFECTOS DE FALLO</b> .....	65
<b>4.3.5 CONSECUENCIAS DE FALLO</b> .....	65
<b>4.3.6 VALORACIÓN DE CADA FALLO</b> .....	66
<b>4.3.6.1 GRAVEDAD</b> .....	66

---

4.3.6.2 FRECUENCIA DE FALLO .....	67
4.3.6.3 DETECTABILIDAD .....	68
4.3.6.4 NÚMERO DE PRIORIDAD DE RIESGO (NPR).....	68
4.3.7 ACTIVIDADES PROACTIVAS PARA PREVENIR LOS FALLOS	69
4.4 METODOLOGÍAS.....	85
4.5 RESULTADOS .....	87
4.6 CONCLUSIONES .....	88
<b>5 DESARROLLO DE LA MEJORA DEL MÉTODO RCM.....</b>	<b>91</b>
5.1 OBJETIVOS.....	91
5.2 DESARROLLO .....	91
5.3 RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	93
<b>6 ESTRUCTURACIÓN DE ACTIVOS.....</b>	<b>95</b>
6.1 OBJETIVOS.....	95
6.2 DESARROLLO ESTRUCTURACIÓN DE ACTIVOS.....	96
6.3 CASO DE ESTUDIO SISTEMAS POR NIVELES.....	98
6.4 RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	100
<b>7 CÁLCULO DE CRITICIDADES .....</b>	<b>103</b>
7.1 OBJETIVOS.....	103
7.2 DESCRIPCIÓN .....	104
7.3 CÁLCULO DE CRITICIDADES SEGÚN ASPECTOS LEGALES Y PUNTOS CRÍTICOS DE LAS INSTALACIONES.....	105
7.3.1 INTRODUCCIÓN.....	105
7.3.2 DESARROLLO Y PROCESO DE CÁLCULO .....	105
7.3.3 CASO DE ESTUDIO.....	110

---

<b>7.4 CÁLCULO DE CRITICIDADES SEGÚN ASPECTOS OPERATIVOS Y NIVELES DE IMPACTO .....</b>	<b>114</b>
<b>7.4.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>114</b>
<b>7.4.2 DESARROLLO Y PROCESO DE CÁLCULO .....</b>	<b>115</b>
<b>7.4.3 CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>119</b>
<b>7.5 CÁLCULO DE CRITICIDADES SEGÚN CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPO .....</b>	<b>132</b>
<b>7.5.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>132</b>
<b>7.5.2 DESARROLLO Y PROCESO DE CÁLCULO .....</b>	<b>133</b>
<b>7.5.3 CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>139</b>
<b>7.5.3.1 FIABILIDAD 1 .....</b>	<b>140</b>
<b>7.5.3.2 FIABILIDAD 2 .....</b>	<b>142</b>
<b>7.5.3.3 FIABILIDAD 3 .....</b>	<b>147</b>
<b>7.5.3.4 APLICACIÓN A EQUIPOS DE UNA PLANTA INDUSTRIAL .....</b>	<b>148</b>
<b>7.6 RESULTADOS .....</b>	<b>153</b>
<b>7.6.1 ASPECTOS LEGALES Y PUNTOS CRÍTICOS .....</b>	<b>153</b>
<b>7.6.2 ASPECTOS OPERATIVOS Y NIVELES DE IMPACTO .....</b>	<b>153</b>
<b>7.6.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS .....</b>	<b>154</b>
<b>7.7 CONCLUSIONES .....</b>	<b>155</b>
<b>8 AMFEC. APORTACIONES Y MEJORAS AL MÉTODO ACTUAL..</b>	<b>157</b>
<b>8.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>157</b>
<b>8.2 IMPLEMENTACIÓN BASES DE DATOS DE MODOS DE FALLOS ..</b>	<b>158</b>
<b>8.2.1 DESARROLLO Y PROCESO DE CÁLCULO .....</b>	<b>158</b>
<b>8.2.2 CASO DE ESTUDIO.....</b>	<b>162</b>
<b>8.3 ESTUDIO NPR (NÚMERO DE PONDERACIÓN DEL RIESGO).....</b>	<b>168</b>
<b>8.3.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>168</b>

---

8.3.2 NPR MACROSCÓPICO .....	169
8.3.2.1 GRAVEDAD .....	169
8.3.2.2 FRECUENCIA DE FALLOS.....	170
8.3.2.3 CÁLCULO.....	171
8.3.3 NPR MICROSCÓPICO .....	172
8.3.3.1 CÁLCULO .....	174
8.3.3.2 CASO DE ESTUDIO DE NPR MICROSCÓPICO. CÁLCULO DE NPR DEL MODO DE FALLO RODAMIENTO DETERIORADO EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA .....	176
8.3.4 PONDERACIÓN DE NPR .....	179
8.3.5 RANGO NPR .....	184
8.4 RESULTADOS .....	185
8.5 CONCLUSIONES .....	186
<b>9 PLANIFICACIÓN DE MANTENIMIENTO .....</b>	<b>189</b>
9.1 OBJETIVOS .....	189
9.2 MATRIZ DE DECISIONES .....	190
9.3 PLAN ESTRATÉGICO DE MANTENIMIENTO .....	190
9.3.1 DEFINICIÓN .....	190
9.3.2 CASO DE ESTUDIO.....	192
9.4 MANTENIMIENTO PREVENTIVO .....	196
9.4.1 DEFINICIÓN .....	196
9.4.2 CÁLCULO DE COSTES.....	197
9.4.3 CASO DE ESTUDIO.....	200
9.5 RESULTADOS .....	207
9.6 CONCLUSIONES .....	207

---

<b>10</b>	<b>INDICADORES DE GESTIÓN</b> .....	209
10.1	OBJETIVOS .....	209
10.2	INTRODUCCIÓN .....	209
10.3	CONCEPTO REPETITIVIDAD .....	211
10.4	INCIDENCIAS Y COSTES .....	211
10.4.1	PROCESO DE CÁLCULO .....	211
10.4.1.1	INCIDENCIAS .....	211
10.4.1.2	COSTE .....	213
10.4.1.3	COSTE - INCIDENCIAS .....	214
10.4.2	CASO DE ESTUDIO .....	216
10.5	MAPA DE VALORES CRÍTICOS E INDICADORES .....	222
10.5.1	BOMBA .....	222
10.5.1.1	PROCESO DE CÁLCULO BOMBA .....	222
10.5.1.1.1	INCIDENCIAS BOMBA .....	222
10.5.1.1.2	COSTE BOMBA .....	224
10.5.1.2	CASO DE ESTUDIO BOMBA .....	225
10.5.2	REACTOR .....	229
10.5.2.1	PROCESO DE CÁLCULO REACTOR .....	229
10.5.2.1.1	INCIDENCIAS REACTOR .....	229
10.5.2.1.2	COSTE REACTOR .....	230
10.5.2.2	CASO DE ESTUDIO REACTOR .....	231
10.6	ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN EN INDUSTRIAS DE PROCESOS .....	235
10.7	RESULTADOS .....	239
10.8	CONCLUSIONES .....	241
<b>11</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	243

<b>12</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>247</b>
<b>13</b>	<b>ANEXO I: NOMENCLATURA.....</b>	<b>269</b>
<b>14</b>	<b>ANEXO II: ECUACIONES .....</b>	<b>291</b>
<b>15</b>	<b>ANEXO III: TABLAS, GRÁFICAS Y FIGURAS .....</b>	<b>311</b>



## AGRADECIMIENTOS

Para empezar quisiera agradecer el apoyo que me ha dado Lucia, Martina y Paula; ya que sin ellas no hubiera realizado esta Tesis Doctoral.

Agradecer al Departamento de Proyectos de Ingeniería e Innovación, por la oportunidad de leer la Tesis en su departamento; así como, a la Universidad Politécnica de Valencia por abrirme sus puertas.

Agradezco al Dr. Luís Amendola por brindarme la posibilidad de dirigir mi estudio, siendo él una de mis referencias tanto en la vida académica como profesional.

Agradezco al equipo de PMM Institute For Learning y en especial a Tibaire Depool, por darme su apoyo y consejos, cuando los he necesitado, en las tareas difíciles de encaminar los planteamientos en mantenimiento y gestión de activos, que he barajado durante todo este tiempo.

Quiero agradecer al Dr. Aitor Goti Elordi, que con su ayuda y confianza, me ha abierto un mundo enriquecedor de relaciones profesionales y humanas.

Por último, agradezco al Comité de Confiabilidad de la Asociación Española para La Calidad, por acogerme en sus congresos y facilitar que pudiese presentar mis estudios.



# 1

## RESUMEN

La tesis doctoral que nos acontece, muestra las premisas básicas acerca de la investigación que se realiza sobre la implantación de Mantenimiento Preventivo y Predictivo en industrias de Proceso, gracias al desarrollo y personalización de la metodología RCM a partir del AMFEC. La metodología RCM, sirve para determinar las actividades de mantenimiento reactivas y proactivas, con objeto de optimizar la fiabilidad de los activos industriales.

Como antecedentes de la tesis doctoral se comenta que la metodología RCM, sirve para determinar las actividades de mantenimiento reactivas y proactivas, con objeto de optimizar la fiabilidad de los activos industriales. Se basa en la obra de John Moubray, donde se basa la implantación del RCM en 7 preguntas. Los métodos de cálculo de criticidades que actualmente se reflejan en los estudios actuales, denotan la oportunidad de desarrollo de métodos de cálculo donde se tengan en cuenta multitud de variables. El número de ponderación del riesgo (NPR) para cada modo de fallo, viene calculándose en función de tres parámetros gravedad, frecuencia de fallos y detectabilidad, siendo habitualmente valorados de 1 a 10, pero invariantes ante variaciones de parámetros técnicos y de operación. Los planes de mantenimiento, aunque bien definidos por las obras de expertos, se vislumbra la oportunidad de desarrollarlos en función de tipos de equipo, tipos de mantenimiento y criticidad de NPR de modos de fallos. Los estudios de indicadores de gestión, son amplios y muy

bien desarrollados, aunque para la detección de repeticiones de incidencias en el Mantenimiento Correctivo, se requiere de una definición o desarrollo.

El objetivo principal del presente estudio es ayudar a la implantación de un método de gestión técnica y económica de activos, basado en la actual implantación de RCM, Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión y definir un método para implantar Mantenimiento Preventivo y Predictivo, controlar las incidencias, costes y aplicar soluciones técnico-económicas; conseguir de este modo, optimizar la gestión de mantenimiento en industrias de proceso. Los objetivos de la tesis doctoral son definir la metodología RCM según John Moubrey; definición de un protocolo para la implantación de las mejoras aportadas a la metodología RCM a través del AMFEC y Mantenimiento Preventivo y Predictivo; estructurar los equipos o activos de estudio por sistemas y grupos de sistemas; desarrollar exhaustivos métodos de cálculo de criticidades, sistematizar la base de datos de modos de fallos para facilitar la realización de AMFEC's; desarrollar un sistema de valoración del riesgo del modo de fallo (NPR) de forma concreta, por tipologías de equipo y además variables en función de cambios en variables técnicas y de operación; diseñar sistemas de medición de frecuencias de fallos por tipologías de equipos; facilitar el diseño del plan de Mantenimiento Preventivo por intervenciones, tipologías de equipos y frecuencias de actuación; y definición de dos nuevos indicadores de gestión, número de incidencias y costes asociados, para controlar la repetición de su aparición en activos de industrias de procesos en Mantenimiento Correctivo.

La metodología adoptada en el presente estudio se basa en el análisis de las diferentes partes que engloban el método RCM; así como, la planificación de mantenimiento, el Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión. Cada una de estas partes y más en concreto las partes más relevantes del RCM, cálculo de criticidades, modos de fallos y NPR; se han utilizado para implantar un sistema de gestión de activos, consiguiendo resultados exitosos, pero denotando oportunidades de mejora en cada una de estas partes. Es cuando se han desarrollado mejoras en cada una de estas partes y se han integrado formando la presente tesis doctoral. Además, para facilitar la comprensión de las mejoras aportadas, para cada desarrollo se muestran ejemplos con casos de estudio reales de la industria de procesos.

Se ha mostrado un ejemplo detallado de aplicación de AMFEC y matriz de decisiones a un grupo motor-bomba, con la metodología actual de RCM. Se ha definido un protocolo a través de un diagrama, acerca de la integración de las mejoras aportadas

tanto a RCM, como Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión, consiguiendo una realimentación del protocolo ajustando aquello que se debiera si los resultados son mejorables. Se ha definido una forma de estructurar activos por sistemas y grupos de sistemas, mostrando un ejemplo con 11 niveles, para facilitar la implantación de las mejoras aportadas según sectores industriales, zonas geográficas, tipos de procesos, tipologías de equipos y elementos, y con ello disponer de una identidad clara de los activos de estudio cuando se empieza a implantar las mejoras.

Se han diseñado tres métodos de cálculo de criticidades, uno según aspectos legales y puntos críticos de las instalaciones, buenos resultados para tener en cuenta los aspectos que rigen una empresa industrial, pero resultados de criticidad catalogados como cualitativos. Otro según aspectos operativos y niveles de impacto se hace hincapié en la importancia del impacto en seguridad, medio ambiente, producción y mantenimiento. El tercero y último es según características de los equipos, donde se ponderan infinidad de variables técnicas, legales, económicas, productivas, etc., que tienen interacción con los activos de estudio, siendo éste método el que da resultados más fiables ya que se pudiéndose variar la cantidad de variables utilizadas en función de la complejidad de las instalaciones de estudio y la precisión en el resultado que se quiera obtener.

Se han definido bases de datos de modos de fallos en tres niveles, para 4 tipos de equipo máquinas rotativas, depósitos, intercambio de calor y valvulería. Se ha realizado un estudio exhaustivo del NPR, con diferentes definiciones de gravedad y frecuencia de fallos; así como, desarrollado dos formas de valorar el NPR una macroscópica y la otra microscópica, además de mostrar como varía el NPR según variaciones de variables técnicas y de operación. Los diferentes parámetros de ponderación y rangos de NPR, sirven para diferenciar su valoración según tipologías de equipos.

Se ha definido el plan Estratégico de Mantenimiento, por tipologías de equipos, tipos de mantenimiento y criticidad de NPR, mostrando frecuencias de intervención de las actividades de mantenimiento. Con la extracción de la información del plan a través de rutas por frecuencia y áreas o plantas industriales, y la valoración económica de cada actividad de mantenimiento, se ha conseguido calcular cada ruta de Mantenimiento Preventivo por frecuencia, áreas o zonas y tipologías de equipo. Con ello, se indica una forma de conseguir resultados para compararlos con los presupuestos de mantenimiento asignados.

Definiendo los indicadores de cantidad de aparición de una misma incidencia y coste asociado, se ha podido realizar el cuadro de mando de las incidencias y costes del Mantenimiento Correctivo. Se ha mostrado un caso de estudio real de una industria de procesos, en los tipos de equipo bombas y reactores. También se ha definido una forma de la organización la información en industria de procesos, con varios diagramas y esquemas, para acabar en las soluciones técnico-económicas que cierra el ciclo.

Como conclusiones se ha definido la filosofía RCM, Mantenimiento Preventivo y Predictivo e indicadores de gestión, se han encontrado necesidades de desarrollo de algunas de sus partes. Si se asignan recursos de Mantenimiento Preventivo y Predictivo en la matriz de decisiones de forma general al activo, se reduce el tiempo de estudio pero no es tan fiable, ya que el valor de NPR por modo de fallo es el objetivo de esta parte del RCM. Definir un protocolo de implantación de las mejoras del método RCM ayuda a visualizar como se quiere trabajar paso a paso, para conseguir los resultados deseados. Estructurando los activos en sistemas y grupos de sistemas, definiendo características similares, facilita implantar más adecuadamente RCM.

El método de cálculo de criticidad por ponderación de características es más flexible y adaptable a cualquier tipo de entorno industrial, donde se pueden utilizar desde unas pocas decenas de variables hasta algunas decenas de miles, según se quiera mayor o menor precisión; un ejemplo de ello, es la criticidad de maquinaria de una carpintería o de una industria nuclear. Las bases de datos de AMFEC y el estudio exhaustivo de NPR, aportan mejoras de valor considerable a la metodología RCM, ya que además de facilitar la confección de AMFEC's, tiene en cuenta variación de parámetros en activos de industrias de procesos.

La estructuración de las actividades de Mantenimiento Preventivo y Predictivo en el plan Estratégico de Mantenimiento, la posterior definición de rutas y el cálculo de costes asociados a ellas, es una forma de controlar con rigurosidad la explotación del mantenimiento de un entorno industrial. La definición de indicadores que midan la repetición de las incidencias y sus costes asociados, facilitan la observación de problemas técnicos y económicos en equipos con mucha presencia en industria de procesos, como son bombas y reactores.

## RESUM

La tesi doctoral que tractem, mostra les premisses bàsiques sobre la recerca que es realitza de la implantació de Manteniment Preventiu i Predictiu en indústries de procés, gràcies al desenvolupament i personalització de la metodologia RCM a partir del AMFEC. La metodologia RCM, serveix per determinar les activitats de manteniment reactives i proactives, a fi d'optimitzar la fiabilitat dels actius industrials.

Com antecedents de la tesi doctoral es comenta que la metodologia RCM, serveix per determinar les activitats de manteniment reactives i proactives, a fi d'optimitzar la fiabilitat dels actius industrials. Es basa en l'obra de John Moubray, on es defineix la implantació del RCM en 7 preguntes. Els mètodes de càlcul de criticitats que actualment es reflecteixen en els estudis actuals, denoten l'oportunitat de desenvolupament de mètodes de càlcul on es tinguin en compte multitud de variables. El nombre de ponderació del risc (NPR) per cada mode de fallada, es calcula en funció de tres paràmetres gravetat, freqüència de fallades i detectabilitat, i habitualment valorats d'1 a 10, però invariants davant variacions de paràmetres tècnics i d'operació. Els plans de manteniment, encara que ben definits per les obres d'experts, s'entreveu l'oportunitat de desenvolupar en funció de tipus d'equip, tipus de manteniment i criticitat de NPR de modes de fallades. Els estudis d'indicadors de gestió, són amplis i molt ben desenvolupats, encara que per la detecció de repeticions d'incidències en el Manteniment Correctiu, es requereix d'una definició o desenvolupament.

L'objectiu principal d'aquest estudi és ajudar a la implantació d'un mètode de gestió tècnica i econòmica d'actius, basat en l'actual implantació de RCM, Manteniment Preventiu i indicadors de gestió i definir un mètode per implantar Manteniment Preventiu i Predictiu, controlar les incidències, costos i aplicar solucions tècnico-econòmiques; aconseguir d'aquesta manera, optimitzar la gestió de manteniment en indústries de procés. Els objectius de la tesi doctoral són definir la metodologia RCM segons John Moubray; definició d'un protocol per a la implantació de les millores aportades a la metodologia RCM a través de l'AMFEC i Manteniment Preventiu i Predictiu, estructurar els equips o actius d'estudi per sistemes i grups de sistemes; desenvolupar exhaustius mètodes de càlcul de criticitats, sistematitzar la base de dades de modes de fallades per facilitar la realització de AMFEC's; desenvolupar un sistema de valoració del risc de la mode de fallada (NPR) de forma concreta, per tipologies d'equip i a més variables en funció de canvis en variables tècniques i d'operació, dissenyar sistemes de mesura de freqüències de fallades per tipologies d'equips; facilitar el disseny del pla de Manteniment Preventiu per intervencions, tipologies d'equips i freqüències d'actuació, i definició de dues nous indicadors de gestió, nombre d'incidències i costos associats, per controlar la repetició de la seva aparició en actius d'indústries de processos en Manteniment Correctiu.

La metodologia adoptada en el present estudi es basa en l'anàlisi de les diferents parts que engloben el mètode RCM, i també, la planificació de manteniment, el Manteniment Preventiu i indicadors de gestió. Cadascuna d'aquestes parts i més en concret les parts més rellevants del RCM, càlcul de criticitats, modes de fallades i NPR, s'han utilitzat per implantar un sistema de gestió d'actius, aconseguint resultats amb èxits, però denotant oportunitats de millora en cadascuna d'aquestes parts. És quan s'han desenvolupat millores en cadascuna d'aquestes parts i s'han integrat formant la present tesi doctoral. A més, per facilitar la comprensió de les millores aportades, per a cada desenvolupament es mostren exemples amb casos d'estudi reals de la indústria de processos.

S'ha mostrat un exemple detallat d'aplicació de AMFEC i matriu de decisions a un grup motor-bomba, amb la metodologia actual de RCM. S'ha definit un protocol a través d'un diagrama, sobre la integració de les millores aportades tant a RCM, com Manteniment Preventiu i indicadors de gestió, aconseguint una realimentació del protocol ajustant allò que es degué si els resultats són millorables. S'ha definit una

---

manera d'estructurar actius per sistemes i grups de sistemes, mostrant un exemple amb 11 nivells, per facilitar la implantació de les millores aportades segons sectors industrials, zones geogràfiques, tipus de processos, tipologies d'equips i elements, i amb això disposar d'una identitat clara dels actius de estudi quan es comença a implantar les millores.

S'han dissenyat tres mètodes de càlcul de criticitats, un segons aspectes legals i punts crítics de les instal·lacions, bons resultats per tenir en compte els aspectes que regeixen una empresa industrial, però resultats de criticitat catalogats com qualitatiu. Un altre segons aspectes operatius i nivells d'impacte es posa l'accent en la importància del impacte en seguretat, medi ambient, producció i manteniment. El tercer i últim és segons característiques dels equips, on es ponderen infinitat de variables tècniques, legals, econòmiques, productives, etc., que tenen interacció amb els actius d'estudi, sent aquest mètode el que dona resultats més fiables ja que es poden variar la quantitat de variables utilitzades en funció de la complexitat de les instal·lacions d'estudi i la precisió en el resultat que es vulgui obtenir.

S'han definit bases de dades de modes de fallades en tres nivells, per a 4 tipus d'equip màquines rotatives, dipòsits, intercanvi de calor i valvuleria. S'ha realitzat un estudi exhaustiu del NPR, amb diferents definicions de gravetat i freqüència de fallades i, també, desenvolupat dues formes de valorar el NPR macroscòpica i l'altra microscòpica, a més de mostrar com varia el NPR segons variacions de variables tècniques i de operació. Els diferents paràmetres de ponderació i rangs de NPR, serveixen per diferenciar la seva valoració segons tipologies d'equips.

S'ha definit el pla Estratègic de Manteniment, per tipologies d'equips, tipus de manteniment i criticitat de NPR, mostrant freqüències d'intervenció de les activitats de manteniment. Amb l'extracció de la informació del pla a través de rutes per freqüència i àrees o plantes industrials, i la valoració econòmica de cada activitat de manteniment, s'ha aconseguit calcular cada ruta de Manteniment Preventiu per freqüència, àrees o zones i tipologies d'equip. Amb això, s'indica una forma d'aconseguir resultats per comparar-los amb els pressupostos de manteniment assignats. Definint els indicadors de quantitat d'aparició d'una mateixa incidència i cost associat, s'ha pogut realitzar el quadre de comandament de les incidències i costos del

Manteniment Correctiu. S'ha mostrat un cas d'estudi real d'una indústria de processos, en els tipus d'equip bombes i reactors. També s'ha definit una forma de l'organització la informació en indústria de processos, amb diversos diagrames i esquemes, per acabar en les solucions tècnico-econòmiques que tanca el cicle.

Com a conclusions s'ha definit la filosofia RCM, Manteniment Preventiu i Predictiu i indicadors de gestió, s'han trobat necessitats de desenvolupament d'algunes de les seves parts. Si s'assignen recursos de Manteniment Preventiu i Predictiu en la matriu de decisions de forma general a l'actiu, es redueix el temps d'estudi però no és tan fiable, ja que el valor de NPR per manera d'error és l'objectiu d'aquesta part del RCM . Definir un protocol d'implantació de les millores del mètode RCM ajuda a visualitzar com es vol treballar pas a pas, per aconseguir els resultats desitjats. Estructurant els actius en sistemes i grups de sistemes, definint característiques similars, facilita implantar més adequadament RCM.

El mètode de càlcul de criticitat per ponderació de característiques és més flexible i adaptable a qualsevol tipus d'entorn industrial, on es poden utilitzar des d'unes poques desenes de variables fins algunes desenes de milers, segons es vulgui major o menor precisió, un exemple d'això, és la criticitat de maquinària d'una fusteria o d'una indústria nuclear. Les bases de dades de AMFEC i l'estudi exhaustiu de NPR, aporten millores de valor considerable a la metodologia RCM, ja que a més de facilitar la confecció de AMFEC's, té en compte variació de paràmetres en actius d'indústries de processos.

L'estructuració de les activitats de Manteniment Preventiu i Predictiu en el pla Estratègic de Manteniment, la posterior definició de rutes i el càlcul de costos associats a elles, és una forma de controlar amb rigor l'explotació del manteniment d'un entorn industrial. La definició d'indicadors que mesuren la repetició de les incidències i els seus costos associats, faciliten l'observació de problemes tècnics i econòmics en equips amb molta presència en indústria de processos, com són bombes i reactors.

## **ABSTRACT**

The doctoral thesis that happens to us, shows the basic assumptions of the research on the introduction of preventive and predictive maintenance industries process, thanks to the development and customization of the RCM of the AMFEC methodology. The RCM, methodology used to determine maintenance activities reactive and proactive in order to optimize the reliability of the industrial assets.

The background of the doctoral thesis says that the methodology RCM, serves to identify the reactive and proactive, peacekeeping activities in order to optimize the reliability of industrial assets. It is based on the work of John Moubray, where the introduction of RCM is based on seven questions. Methods of calculation of criticalities currently reflected in current study denote the opportunity to develop methods of calculation where many variables are taken into account. Risk (NPR) for each mode of failure, weighting number comes severity, frequency of failures and discoverability be calculated based on three parameters, being usually rated from 1 to 10, but invariant to variations of technical parameters and operation. Maintenance plans but well defined by the work of experts, develop depending on types of equipment, types of maintenance and criticality of NPR failure modes in sight. Studies of management, indicators are spacious and very well developed, although for the detection of repetition of incidents in the corrective maintenance, requiring a definition or development.

The main objective of this study is to assist the implementation of a method of technical and economic management of assets, based on the current implementation of RCM, Preventive Maintenance and management indicators and define a method to implement preventive and predictive maintenance, control incidents, costs, and implement technical solutions; thus, optimizing the management of maintenance in process industries . The doctoral thesis aims to define the RCM according to John Moubray; methodology definition of a protocol for the implementation of the improvements made to the RCM the AMFEC and preventive maintenance methodology and predictive; structure study by groups of systems and systems assets or computers; develop comprehensive methods of calculation of criticalities, systematize the modes to facilitate AMFEC bug database's; develop a system of assessment of the risk of failure (NPR) mode specifically for computer and also variables depending on changes in technical variables and operational typologies; designing measuring frequency bug by typologies of equipment systems facilitate the design plan preventive maintenance interventions, types of equipment and frequencies of performance; and two new indicators management, number of incidents and costs associated to control repetition of his appearance in assets of industries of corrective maintenance processes definition.

The methodology adopted in this study is based on the analysis of parts that encompass the RCM; method as well as, maintenance, preventive maintenance planning and management indicators. Each of these parties, and in particular more relevant parts of the RCM, calculation criticalities, failures and NPR; modes have been used to implement a system of asset management, achieving successful results, but denoting opportunities for improvement in each of these parts. This is when improvements in each of these parts have been developed and integrated forming the present thesis. In addition, to facilitate understanding of the improvements made, for each development examples with real case studies from the process industry.

A detailed example AMFEC application and making a group matrix motor-pump current methodology RCM has shown. Set a protocol on a diagram, on the integration of both improvements to RCM, such as preventive maintenance and management, indicators and a feedback protocol adjusting what it should be if the results are improved. Set a way of structuring assets by groups of systems, showing an example with 11 levels, to

facilitate the implantation of contributed improvements in industrial sectors, geographical areas, types of processes, types of equipment and supplies, and thereby have a clear identity study asset when you begin to implement improvements.

It designed three methods of calculation of criticalities, one depending on legal issues and results to take into account aspects governing a company industrial, but results of criticality catalogued as qualitative critical facilities, good points. Other according to operational aspects and impact levels emphasizing the importance of the impact on safety, environmental protection, production and maintenance. The third and last is according to characteristics of the equipment, where countless variables technical, legal, economic, productive, etc., which have interaction with assets of study, and this method which results in more reliable since it can be weighted vary the number of variables used depending on complexity of facilities study and accuracy in the result to be obtained.

It defined database failures on three levels, modes for 4 types of equipment rotary machines, deposits, exchange of heat and valves. Completed a study in-depth the NPR with different definitions of severity and frequency of faults; as well as, developed two ways of assessing the NPR macroscopic and microscopic, and show how varies the NPR depending on changes in technical variables and operation. Different weighting parameters and ranges of NPR, serve to differentiate its valuation according to types of computers.

Set the types of equipment, maintenance and criticality of NPR, strategic maintenance plan showing frequencies of peacekeeping intervention. Checking information plan routes frequency areas or industrial plants and the economic valuation of each maintenance activity has been calculating each path of preventive maintenance by frequency, areas or zones and types of equipment. This indicates a way of achieving results for comparison with the assigned maintenance budgets.

Defining number of occurrence of a same incidence and associated cost indicator, could be performed box control incidents and the corrective maintenance costs. A case

study real industry processes, types of equipment has been bombs and reactors. Also set a form of the organization information in industry processes, with multiple diagrams and schemes, to finish in the technical solution that closes the cycle.

Conclusions set the RCM, preventive maintenance and predictive philosophy and management, indicators were found development needs of some of its parts. If provision of preventive and predictive maintenance in the matrix of decisions generally to the asset, it reduces the time to study, but is not as reliable as NPR by crash mode is the objective of this part of the RCM. Define a protocol implementation of improvements to the RCM method helps to visualize as it wants to work step by step, to achieve the desired results. It structuring assets in groups of systems, and systems defining similar characteristics, makes it easy to deploy more adequately RCM.

The method of calculation of criticality by weighting features is more flexible and adaptable to any industrial environment, where can be used from a few tens of variables until some tens of thousands, as we want more or less precision; an example of this is a carpenter or a nuclear industry machinery criticality. AMFEC databases and the exhaustive study of NPR, bring improvements of considerable value to the RCM, methodology since apart from facilitating AMFEC clothing's, given variation of parameters in assets of process industries.

The structuring of the activities of preventive and predictive maintenance plan strategic maintenance, the subsequent definition of routes and the calculation of costs associated with them, is a way to control the exploitation of the maintenance of an industrial environment with rigor. The definition of indicators to measure the repetition of incidents and their associated costs, facilitate observation teams with great presence in industry processes, economic and technical problems such as pumps and reactors.

## 2

# INTRODUCCIÓN

El Mantenimiento es un conjunto de actividades técnicas de aplicación directa, estructurales y de control económico que satisfacen diversas condiciones. Entre ellas, conseguir que el ciclo de vida, la vida útil de las instalaciones, máquinas y edificios sea lo más prolongado posible; lo que permite que el valor de las inversiones permanezca activo durante el tiempo de amortización e incluso después.

De otra parte, el mantenimiento ha de procurar que durante esta vida útil los costes de explotación sean mínimos, aplicando en cada caso y momento, las técnicas y métodos óptimos, para garantizar un coste razonable y la continua disponibilidad de máquinas e instalaciones.

Se pueden establecer como principales objetivos del Mantenimiento:

- a. Reducir al mínimo los costes debidos a las paradas por averías accidentales de la maquinaria que componen pérdidas de producción o de servicios, incluyendo en tales costes los correspondientes al propio Mantenimiento.
- b. Limitar el deterioro de la maquinaria y, en consecuencia, el incremento de rechazos o la degradación de calidad del producto.
- c. Proporcionar conocimientos y asistencia, a partir de la experiencia adquirida, a todos aquellos que intervienen en el proyecto y gestión de nuevas instalaciones.

## 2.1 OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL

Mostrar las aportaciones al método RCM; así como, al Mantenimiento Preventivo en su faceta de planificación y control económico; y a indicadores de gestión en su vertiente de control de repetición de incidencias en activos de industrias de procesos. El objetivo principal es ayudar a la implantación de un método de gestión técnica y económica de activos, basado en la actual implantación de RCM, Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión. Para conseguir estos objetivos totales, se determinan una serie de objetivos parciales que se desarrollan en cada uno de los capítulos mostrados en la tesis doctoral.

Para poder aportar mejoras o desarrollos, primero se deben definir como son cada unos de estos métodos; por tanto, uno de los objetivos será éste.

Gran parte del desarrollo de la investigación se basa en la metodología RCM, en su vertiente definida por John Moubray [176], por ello uno de los objetivos es explicar en qué consiste las 7 preguntas del RCM. También, se tiene por objetivo mostrar otras metodologías de gestión de activos.

Al realizar aportaciones en los métodos comentados, uno de los objetivos es el diseño de un diagrama o protocolo para la implantación tanto de los métodos existentes como de las mejoras aportadas, todo definido en un diagrama que muestre dicho proceso.

Debido a la rigurosidad de RCM, Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión, existe el objetivo de definir de forma exhaustiva a qué activos y de qué forma se organizan, para tener una estructuración de activos que determine la amplitud de la aplicación de las aportaciones de la tesis doctoral.

Una de los objetivos más importantes, es el diseño de un método de cálculo de la criticidad de activos, para dar prioridad a los recursos de mantenimiento que se deben aportar a los mismos. Como con los activos interactúan infinidad de variables y parámetros, se deben diseñar varios métodos de cálculo de la criticidad que hagan relacionar dichas variables y parámetros, y en función de los resultados obtenidos en los casos de estudio, se seleccionará el más adecuado, más fiable o riguroso.

Dada la gran diversidad de modos de fallos que pueden aparecer en los activos de industria de procesos, la confección de AMFEC's es muy laboriosa; por tanto, uno de los objetivos es la creación de bases de datos de modos de fallos comunes para diferentes activos, definiendo frecuencia de fallos y detectabilidad. Otro objetivo dentro

del AMFEC, es el desarrollo de cómo se trabaja con el número de ponderación del riesgo (NPR), para considerar conceptos técnicos-económicos o ecuaciones fundamentales de fenómenos físico-químicos; así como, definir la variabilidad del NPR de cada modo de fallo, en función de variación de variables de proceso y variables técnicas.

Otro objetivo es la definición del Plan Estratégico de Mantenimiento, que es la extracción de las actividades y frecuencias definidas en la matriz de decisiones, en función de los modos de fallos aparecidos y su nivel de criticidad del modo de fallo. Una vez se defina el plan, las rutas de Mantenimiento Preventivo deben organizar la actividades de mantenimiento por frecuencia, especialidad, área o zona, tecnología, etc. La cuantificación económica de las rutas serán la base de la toma de decisiones, para ajustes de presupuestos asignados al mantenimiento y con ello un objetivo a cumplir.

El último objetivo, es definir indicadores de gestión que midan y controlen las incidencias y su repetición, en activos de industria de procesos, para ver donde se deben aportar mejoras técnicas y económicas.

Para cada uno de los objetivos comentados, desarrollados en los capítulos de la presente tesis, se vislumbran casos de estudio para facilitar al lector la comprensión del su desarrollo.

## **2.2 HIPÓTESIS**

Para llegar a las conclusiones indicadas en los capítulos de la tesis doctoral, las hipótesis que la sostienen se basan en el desarrollo de mejoras de la metodología RCM, Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión, se necesita el desarrollo de ecuaciones y series para definir los comportamientos de los activos y su entorno, a nivel técnico y económico, para alcanzar una correcta gestión de mantenimiento. Existen métodos de implantación de metodología RCM, Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión, son en ellos que se basan para desarrollar ecuaciones y series de estructuración de activos, cálculos de criticidades, modos de fallos, NPR, planificación de mantenimiento e indicadores de gestión.

En el desarrollo de la tesis, se basa en que los activos pueden fallar tanto mecánica como eléctricamente en cualquiera de sus componentes, también se basa en que

pueden existir infinitas variables que impacten en la criticidad de un activo, pero inicialmente se basa en que el impacto mayormente es en seguridad, medio ambiente y pérdidas operativas por producción o mantenimiento.

Las ecuaciones y series, parten de la base que para definir las se estructura desde la hipótesis de una población infinita de activos que se puede estructurar y agrupar en sistemas, y es a cada uno de ellos se le puede aplicar la mejora de la metodología RCM, Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión en cada una de las partes indicadas en la presente tesis.

## **2.3 APORTACIONES Y CONTENIDO POR CAPÍTULOS DE LA TESIS DOCTORAL**

**Capítulo 3: Estado del Arte.** Este capítulo muestra las tendencias en la actualidad en la gestión de activos e indica las necesidades de aportar desarrollos y mejoras en la implantación de la metodología RCM, Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión. Se indican las publicaciones del autor de la tesis doctoral.

**Capítulo 4: Definición del método RCM en la actualidad.** Se define la metodología RCM definida por John Moubrey [176] con sus 7 preguntas, se muestran ejemplos de hoja AMFEC y matriz de decisiones de un grupo motor-bomba con tres niveles de modos de fallo y tres niveles de criticidad del NPR. Se indican dos metodologías de gestión de activos una es la estrategia de SAMI (Strategic Asset Management Inc.) y la otra el modelo BMM (Business Maintenance Model) de Asset Management de PMM Institute For Learning. La aportación de la tesis en este capítulo es el diseño, por parte del autor de la tesis doctoral, del modelo de gestión de activos utilizado que es el esquema de implantación de Mantenimiento Preventivo y Predictivo.

**Capítulo 5: Desarrollo de la mejora del método RCM.** Tanto el contenido como la aportación de la tesis en este capítulo, es la definición del protocolo de la mejora de la metodología RCM a partir del AMFEC.

**Capítulo 6: Estructuración de activos.** El contenido la forma de estructurar y agrupar los activos, para facilitar la implantación de la metodología RCM. Se muestra ejemplo de niveles y grupos de sistemas. La aportación es la definición en la estructuración de sistemas y grupos de activos; así como, en su cuantificación.

**Capítulo 7: Cálculo de criticidades.** Se muestran tres métodos para el cálculo de la criticidad, al ser novedosos forman parte de la aportación de la tesis en este capítulo. Éstos son:

- a. Cálculo de criticidades según aspectos legales y puntos críticos de las instalaciones.
- b. Cálculo de criticidades según aspectos operativos y niveles de impacto.
- c. Cálculo de criticidades según características de los equipos.

Con sus casos de estudio se vislumbran ejemplos para cada método.

**Capítulo 8: AMFEC. Aportaciones y mejoras al método actual.** Contiene bases de datos de modos de fallos de equipos de industria de proceso, desarrollo de NPR según aspectos técnico-económicos y ecuaciones de fenómenos físico-químicos; así como, variabilidad de NPR en función de variación de variables y parámetros operativos y técnicos. La ponderación y rango de NPR, pone fin a un desarrollo exhaustivo del NPR, que se convierte en la aportación más interesante de la tesis en este capítulo.

**Capítulo 9: Planificación de mantenimiento.** Contiene la definición del Plan Estratégico de Mantenimiento, siendo la forma de organizarse la mejor aportación. Se define como se extraen rutas de Mantenimiento Preventivo del plan y como se cuantifican económicamente, por frecuencias, tipos de equipo y plantas.

**Capítulo 10: Indicadores de gestión:** Se muestra tipologías de incidencias, para poder ubicar las órdenes de trabajo según causa, así se mide la repetición de las incidencias y su impacto económico. Los casos de estudio son muy elaborados, a partir de una base de datos muy extensa, obteniendo resultados muy interesantes, se

muestran para bombas y reactores; siendo, ésta la mejor muestra de aportación de la tesis en este capítulo. Dentro del capítulo, también se define la forma de organizar la información en industrias de procesos y la toma decisiones técnicas y económicas, para solventar los desajustes.

## 2.4 DEFINICIONES

En el subcapítulo de definiciones, se ha colocado al principio de la tesis doctoral para facilitar la comprensión del texto y darle a las definiciones de mantenimiento, una entidad propia dentro de la estructura de capítulos de desarrollo, dada su importancia; en lugar de colocarlas al final en un glosario.

**Activo:** Conjunto de ítems de carácter permanente que una empresa o entidad utiliza como medio de explotación.

**AMFEC (Análisis de Modos de Fallos Efectos y Criticidad):** Parte principal del método RCM, donde se definen los modos de fallos y su impacto en el sistema que se esté estudiando.

**Árbol de fallos:** Sistema lógico secuencial de acontecimientos utilizado para el análisis de fiabilidad de un ítem.

**Avería:** Cese de la capacidad de un ítem para realizar su función específica. Equivale al término Fallo.

**Calorifugado:** Capa de elemento aislante del calor, que se coloca en equipos que en su proceso de funcionamiento está sometido a temperaturas elevadas. Su función además de aumentar la eficiencia energética de un equipo, lo protege contra posibles contactos humanos.

**Ciclo de vida:** Tiempo durante el cual un ítem conserva su capacidad de utilización. El período abarca desde su adquisición hasta que es sustituido o es objeto de restauración / rehabilitación.

**Control de Condición:** Comprobación del estado real de un ítem mediante control sistemático periódico o continuo de un parámetro significativo. Equivale a los términos control de estado y condition monitoring.

**Coste directo de mantenimiento:** Gastos en mano de obra propia, materiales de repuesto, servicios contratados, parte proporcional de los costes de supervisión y medios empleados en la reparación de la avería o reposición de un ítem. También se puede definir como el coste de evitación del daño o el coste de disponibilidad.

**Coste indirecto de mantenimiento:** Gastos derivados de las pérdidas de producción, rendimiento y calidad, y los daños a la seguridad y medio ambiente ocasionados por la avería de un ítem también se puede definir como el coste de la indisponibilidad.

**Disponibilidad:** Capacidad de un ítem para desarrollar su función en un determinado momento, o durante un determinado período de tiempo, en unas condiciones y con un rendimiento definidos. Puede expresarse como la probabilidad de que un ítem pueda encontrarse disponible para su utilización en un determinado momento o durante un determinado período de tiempo. La disponibilidad de un ítem no implica necesariamente que esté funcionando, sino que se encuentra en condiciones de funcionar. Una medida práctica de la disponibilidad de un ítem como parámetro de referencia es la definida por la relación entre tiempo de operación (tiempo real de funcionamiento correcto produciendo) y el tiempo total que se necesita que funcione (tiempo durante el que hubiese querido producir).

**Equipo:** Unidad compleja de orden superior integrada por conjuntos, componentes y piezas, agrupados para formar un sistema funcional (intercambiador de calor, transformador eléctrico). Equivale al término máquina.

**Fallo:** Cese de la capacidad de un ítem para realizar su función específica. Equivale al término avería.

**Fiabilidad:** Capacidad de un ítem para efectuar su función específica en unas condiciones y con un rendimiento definidos durante un período de tiempo determinado. Puede expresarse como la probabilidad de que funcione correctamente en las condiciones operativas de diseño durante un determinado período de tiempo.

**Ficha histórica:** Registro de las incidencias, averías, reparaciones y actuaciones en general que conciernen a un determinado ítem. Equivale al término historial.

**Gestión de mantenimiento:** Actuaciones con las que la dirección de una Organización de Mantenimiento sigue una política determinada.

**GMAO:** Gestión de Mantenimiento Asistida por Ordenador.

**Ingeniería de mantenimiento:** Organismo consultivo que constituye el sistema de control de la dirección del mantenimiento, para corregir y mejorar la gestión. Su misión es perfeccionar las técnicas organizativas y los métodos y procedimientos de trabajo, favoreciendo la implantación de la Política de Mantenimiento más adecuada y el desarrollo de nuevas ideas.

**Ítem:** Sistema, subsistema, instalación, planta, máquina, equipo, estructura, edificio, conjunto, componente o pieza que pueda ser considerada individualmente y que admita su revisión o prueba por separado.

**Mantenibilidad:** Facilidad con la que puede realizarse una intervención de mantenimiento. Se puede expresar como la probabilidad de que un ítem averiado puede ponerse de nuevo en un estado operativo en un período de tiempo dado, cuando el mantenimiento se realiza con condiciones determinadas y se efectúa con los medios y procedimientos establecidos.

**Mantenimiento:** Conjunto de actividades técnicas y administrativas cuya finalidad es conservar, o restituir, un ítem en/a las condiciones que le permitan desarrollar su función.

**Mantenimiento por avería:** Mantenimiento efectuado a un ítem cuando la avería ya se ha producido, restituyéndole a condición admisible de utilización. Equivale al término Mantenimiento Correctivo (de preferible uso).

**Mantenimiento Centralizado:** Organización de Mantenimiento en la que el ámbito de actuación de cada uno de los oficios, especialidades o talleres se extiende a todo centro de trabajo.

**Mantenimiento Contratado:** Mantenimiento realizado por personal ajeno a la plantilla propia.

**Mantenimiento Correctivo:** Mantenimiento efectuado a un Ítem cuando la avería ya se ha producido, restituyéndole a Condición Admisible de utilización. El Mantenimiento Correctivo puede, o no, estar planificado.

**Mantenimiento Descentralizado:** Organización de Mantenimiento consistente en dividir el puesto de trabajo en áreas, zonas, plantas, etc., a cada una de las cuales se asigna un determinado personal.

**Mantenimiento de Emergencia:** Mantenimiento Correctivo que es necesario efectuar inmediatamente para evitar graves consecuencias.

**Mantenimiento de Mejoras:** Este tipo de mantenimiento abarca desde las pequeñas mejoras por la antigüedad de equipos (obsolescencia), mejoras procedentes de adecuación de instalaciones a fabricación de nuevos productos; así como, adecuación de instalaciones procedentes de nuevos proyectos.

**Mantenimiento en operación:** Acciones de mantenimiento que pueden efectuarse mientras el ítem está en operación.

**Mantenimiento planificado:** Mantenimiento organizado y efectuado con previsión y control. El Mantenimiento Preventivo siempre se planifica. El Mantenimiento Correctivo puede, o no, estar planificado.

**Mantenimiento Predictivo:** Mantenimiento Preventivo basado en el conocimiento del estado de un ítem por medición periódica o continua de algún parámetro significativo. La intervención de mantenimiento se condiciona a la detección precoz de los síntomas de avería.

**Mantenimiento Preventivo:** Mantenimiento que consiste en realizar ciertas reparaciones, o cambios de componentes o piezas, según intervalos de tiempo, o según determinados criterios, prefijados para reducir la probabilidad de avería o pérdida de rendimiento de un ítem. Siempre se planifica.

**Mantenimiento Programado:** Mantenimiento Preventivo que se efectúa a intervalos predeterminados de tiempo, número de operaciones, recorrido, etc.

**Mantenimiento de rotura:** Mantenimiento efectuado a un ítem cuando la avería ya se ha producido, restituyéndole a condición admisible de utilización. Equivale al término Mantenimiento Correctivo (de preferible uso).

**Mantenimiento según Condición:** Mantenimiento Preventivo basado en el conocimiento del estado de un ítem por medición periódica o continua de algún parámetro significativo. Equivale al término Mantenimiento Predictivo (que es preferible).

**Mantenimiento de Seguridad:** Mantenimiento que está relacionado con las actuaciones en ámbito de seguridad y medio ambiente, ya bien puedan afectar a bienes y/o personas, de acuerdo con planes previamente establecidos.

**Mantenimiento de urgencia:** Mantenimiento Correctivo que es necesario efectuar inmediatamente.

**Manual de Mantenimiento:** Recopilación de la información, datos y recomendaciones necesarias para el correcto mantenimiento de un ítem.

**Máquina:** Unidad compleja de orden superior integrada por conjuntos, componentes y piezas, agrupadas para formar un sistema funcional (torno, compresor). Equivale al término equipo.

**Mejora:** Alteración efectuada a un ítem de la que se espera/obtiene un perfeccionamiento en su función.

**Niveles de Criticidad:** Niveles de severidad que se otorgan a un sistema cuando puede adoptar varios estados en los que puede surgir un suceso con mayores o menores consecuencias en medio ambiente, seguridad, calidad, producción y mantenimiento.

**Operación:** Situación de un ítem que está efectuando su función. Equivale a los términos en marcha y servicio.

**Orden de trabajo:** Instrucción escrita que define el trabajo que debe llevarse a cabo por la Organización de Mantenimiento.

**Parada General:** Situación de un conjunto de ítems al que se efectúa periódicamente revisiones y reparaciones concentradas y programadas en un determinado período de tiempo. Equivale al término reparación general cuando éste se refiere a una instalación o planta y tiene carácter periódico.

**Parada programada:** Parada debida a la interrupción no programada de operación de un ítem.

**Parametrizado:** Sistema compuesto por variables a los cuales se les ha determinado un parámetro o valor.

**Plan de Mantenimiento:** Relación detallada de las actuaciones de mantenimiento que requiere un ítem y de los intervalos con que deben efectuarse.

**Planificación del Mantenimiento:** Análisis y decisión previa de las actuaciones, secuencia, métodos de trabajo, materiales y repuestos, útiles y herramientas, mano de obra y tiempo necesario para la reparación de un ítem.

**Procesista:** Persona que utilizan métodos para implantar sistemas de gestión en una organización.

**Proactivo:** Método que supone trabajar de forma activa constantemente con el objetivo de mejora continua. El Mantenimiento Proactivo; además de utilizar los métodos más avanzados cuestiona constantemente los resultados que se obtienen y así se consigue mejorarlos.

**Programa Mantenimiento:** Documento que define la fecha prevista de realización de determinados trabajos de mantenimiento.

**Reactivo:** Método que se pone en marcha inmediatamente cuando ha surgido un suceso. Mantenimiento Reactivo, es cuando se actúa de forma solamente y de forma inmediata cuando ha surgido en suceso o avería.

**Reparación:** Restitución de un ítem a condición admisible de utilización mediante el arreglo o reposición de las partes dañadas, desgastadas o consumidas.

**Repuesto:** Pieza, componente, conjunto, equipo o máquina perteneciente a un ítem de orden superior que sea susceptible de sustitución por rotura, desgaste o consumo. Equivale al término recambio.

**RCM ((Reliability Centered Maintenance) Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad)):** Método que busca sistematizar y viabilizar las posibles formas de fallar de un sistema en su fase de diseño o de funcionamiento.

**Terotecología:** Conjunto de prácticas de dirección, financieras, técnicas y de otros tipos que se aplican a activos físicos para reducir los costes del ciclo de vida. Comprende la especificación y diseño de Ítems teniendo en cuenta su fiabilidad y mantenibilidad, incluyendo su construcción, montaje, instalación, puesta en operación, mantenimiento, reposiciones, mejoras y reformas, con retro-información sobre diseño, rendimiento, comportamiento y costes.

**Tiempo de Ejecución:** Período de tiempo en que una o más personas, o un sistema automático, están realizando a un ítem trabajos de mantenimiento.

**Tiempo de inactividad de mantenimiento:** Período de tiempo en el que el mantenimiento no trabaja en un ítem que está fuera de servicio a causa de una avería, por razones ajenas al propio mantenimiento (horario de trabajo establecido, huelgas, etc.).

**Tiempo de inactividad de operación:** Período de tiempo en el que un ítem está disponible para desarrollar su función, pero no es utilizado por falta de mercado, huelgas, falta de materias primas o energía, etc.

**Tiempo de operación:** Período de tiempo en el que un ítem está realizando su función.

**Tiempo de parada:** Período de tiempo en el que un ítem no está en operación.

**Tiempo de preparación y espera:** Período de tiempo en el que el mantenimiento no trabaja en un ítem que está fuera de servicio a causa de una avería, por razones

atribuibles al propio mantenimiento (falta de personal, útiles, herramientas o repuestos, desplazamientos, etc.).

**Tiempo medio entre fallos (MTBF):** Tiempo medio entre averías sucesivas de un ítem reparable. Se representa como TMEF y es inverso a la tasa de fallos.

**Tiempo medio de reparación (MTTR):** Tiempo medio necesario para reparar un ítem. Se representa como TMDR.

**Tiempo de parada:** Período de tiempo en el que un ítem no está en operación.

**Tiempo de reparación y de espera:** Período de tiempo en el que mantenimiento no trabaja en un ítem que está fuera de servicio a causa de una avería, por razones atribuibles al propio mantenimiento (falta de personal, útiles, herramientas o repuestos, desplazamientos, etc.).

**TPM:** Sistema de organización de trabajo en el que el parte de mantenimiento (limpiezas, engrases, aprietes, cambios de herramientas y piezas de desgaste, pequeñas reparaciones y comprobaciones, inspección visual) lo realiza el operador del equipo o máquina, quedando a cargo de la propia organización del mantenimiento las inspecciones, revisiones y reparaciones de mayor entidad.

**Tribologías:** Conjunto de conocimientos, técnicas y prácticas relativas al rozamiento y la lubricación.

**Vibración:** Movimiento oscilante respecto a una posición de referencia de las partículas de un cuerpo sólido.

## 2.5 DEFINICIÓN DE NECESIDAD

Debido a la gran demanda de competitividad en las industrias españolas y a la amenaza de la des-localización de las mismas hacia Europa del Este a causa del bajo coste de la mano de obra; existe la necesidad de que todos los departamentos de una empresa sean cada vez más competitivos. El caso que ocupa dicho trabajo de tesis doctoral, basa sus esfuerzos en mejorar la competitividad del departamento de mantenimiento de las industrias de proceso.

Gracias a las numerosas publicaciones sobre gestión de mantenimiento, se hace más ameno diseñar un camino a seguir para llegar a la excelencia de la actuación sobre los activos de una industria de proceso.

Las incidencias de mantenimiento causan un gasto a las empresas, que normalmente quieren reducir o eliminar bajo cualquier concepto. Es difícil demostrar las causas que provocan las averías en las máquinas, ya que están sometidas a muchos factores aleatorios relacionados con fiabilidades de aparición de roturas, desgastes, deterioros, etc. Como normalmente el mantenimiento no se considera un bien más de los activos de las empresas, no se realizan estudios profundos de causalidad, fiabilidad y repetición de incidencias. Por ello, se crea la necesidad de establecer un protocolo o camino a seguir, para extraer la información necesaria para poder visualizar con claridad los puntos críticos y costosos del mantenimiento de un centro industrial o productivo. Una vez detectados hay que aplicar soluciones tecnológicas y cuantificarlas económicamente, para ver su rentabilidad tanto económica como técnica.

## **2.6 RESEÑAS HISTÓRICAS DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

### **2.6.1 ANTIGUAS CIVILIZACIONES**

El concepto del mantenimiento es tan antiguo como la Humanidad. Los egipcios tenían sistemas de mantenimiento cuando construían las pirámides. El éxito de la extensión de la primera civilización más potente que fue la del Imperio Romano, es debido a la construcción de las vías de comunicación; las uniones se hacían con plomo y había cuadrillas de mantenimiento de la calzada. El declive del Imperio se debió a la dejadez de mantenimiento, ya que los Bárbaros robaban el plomo.

### **2.6.2 REVOLUCIÓN INDUSTRIAL**

La época cuando reflota el mantenimiento es en la Revolución Industrial, nace el concepto de máquina industrial, es en esta época el concepto de máquina es un bienpreciado. Las máquinas se diseñan para durar siempre y su estructura es muy rígida y por tanto muy fiable, lo es porque son máquinas muy elementales, con pocas piezas y

muy robustas. El concepto es el de Mantenimiento Autónomo, el *artista* es su amo, no existe el concepto de la actividad de mantenimiento que se debe realizar a parte del diseño y construcción de la máquina; este concepto pervive hasta bien adentrado el siglo XX.

### **2.6.3 DÉCADAS 40 Y 50**

La expansión del Mantenimiento Industrial es en la 2ª posguerra mundial, sobre las décadas de 40 y 50. Hablar de mantenimiento sin desarrollos productivos no tiene sentido. Se empieza a producir en masa para satisfacer las necesidades de gente; se tiene que empezar a producir; se crea el concepto de líneas de manufactura, sobretudo en la Europa devastada por la Guerra. Esta gran industrialización, implica la construcción de máquinas más complejas y menos robustas, se entra en el concepto de la competitividad. Antes no existían las velocidades de producción y en esta época empieza a introducirse este concepto (turbomáquinas, máquinas rotativas, etc.), a mayor velocidad mayor desgaste y abrasión; por tanto las máquinas empiezan a necesitar intervenciones de mantenibilidad. Las máquinas se van complicando. Antes de mantenimiento hay que hablar de fiabilidad (mayor número de piezas, mayor complejidad, diseños más ajustados,...), ahora nace el concepto de avería.

### **2.6.4 INICIOS DEL TPM EN DÉCADA DE LOS 50 (INDUSTRIA MANUFACTURERA)**

En los años 50 nace el primer concepto de Mantenimiento Preventivo por Reposición (se pierde dinero si tengo que esperar a solucionar la avería y no produzco); estadísticamente el Mantenimiento Preventivo Planificado es caro, empieza bien pero su efectividad es cuestionable. Es el empresario que ve la primera luz de la no eficacia de dicho mantenimiento.

Los primeros que se preocupan de esto son los Japoneses, al final de la década de los 50 ya empiezan a imitar y a aprender de mantenimiento. La primera empresa que implanta una industria manufacturera en Japón es Toyota, otro tipo de industria es la de procesos (energía, petroquímicas, químicas, etc.).

## **2.6.5 CREACIÓN DE TPM EN DÉCADAS DE LOS 60 Y 70 (INDUSTRIA MANUFACTURERA)**

En el sector manufacturero se paran mucho las líneas y se entra en el concepto de Mantenimiento Productivo, donde se vuelven a los orígenes del siglo XIX, los operarios protagonizan las intervenciones de primer nivel. En los años 60 y 70 se convierte en Mantenimiento Productivo Total (TPM), su creador es Seiichi Nakajimi (vicepresidente de JIPM). Actualmente el TPM o su variante pragmática Mantenimiento Autónomo es el modelo de referencia en el sector del automóvil y en muchas industrias manufactureras (farmacéuticas, alimentarias, metal-mecánicas,...). El problema fundamental es su concepción original; el TPM está sustentado en 12 fases y una de ellas contempla el Mantenimiento Planificado, no obstante el Mantenimiento Autónomo contempla la intervención que puede realizar el operario y no las intervenciones complejas y duraderas.

## **2.6.6 TEROTECNOLOGÍA, DÉCADA DE LOS 60**

Las primeras nociones sobre la problemática integral industrial nace en el Reino Unido en los años 60, donde se anuncia una nueva disciplina llamada Terotecnología. Diversos estudios demuestran que alrededor de 80% de los costes de explotación producción y mantenimiento de un activo industrial se determinan en la fase de Ingeniería. Por ello como complemento del TPM, en Japón, desde hace varias décadas se maneja el concepto de prevención del mantenimiento, que implica la realimentación de las experiencias del mantenimiento hacia la ingeniería.

## **2.6.7 MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO DÉCADAS 50, 60 Y 70 (INDUSTRIA DE PROCESOS)**

En la industria de procesos el desarrollo desde los años 50 empieza por otro camino, el modelo más avanzado que suple la carencia de Mantenimiento Planificado, aparece el concepto de sobremantenimiento, nace como una secuela negativa de demasiados paros planificados que aparte de costosas no resuelven el problema de baja fiabilidad de muchos activos; por ello, en los años 60 y 70 se introduce el modelo del mantenimiento basado en estado o condiciones reales de activos industriales, popularmente llamado Mantenimiento Predictivo.

Los primeros pasos en este sentido, se dan cuando las intervenciones planificadas con reposiciones de elementos de máquinas a frecuencia fija, se empiezan a sustituir por las inspecciones cualitativas (gamas de preventivo). El Mantenimiento Predictivo da otra dimensión a dichas inspecciones, ya que se basa en mediciones periódicas de variables de estado técnico (amplitudes de vibración y sus frecuencias, impulsos de choque, temperatura, presión, espesores, etc.), observando la tendencia del cambio de niveles medidos en su comparación con ciertos patrones de referencia (ejemplo: normas de severidad de vibración). De esta manera, se organizan sistemas de auscultación de activos en operación para determinar sus necesidades reales de intervención correctiva, preventiva o de mejora, todo ello sin interferencia con la disponibilidad productiva de la instalación.

Al principio el Mantenimiento Predictivo, no es asequible debido a los altos costes de la instrumentación analógica. Se expande por los sectores estratégicos de la industria de procesos petroquímicas y energéticos, pero posteriormente a medida que pasa el tiempo y gracias a las mejoras tecnológicas se expande a químicas, cementeras, papeleras y gracias a una gran oferta tecnológica de instrumentos portátiles se implanta en los sectores manufactureros.

## **2.6.8 INTRODUCCIÓN DEL GMAO DÉCADA DE LOS 80**

El siguiente hito importante es el desarrollo del Mantenimiento Asistido Por Ordenador. Representa la introducción de la información de usuario a principios de los 80, que conlleva el desarrollo de aplicaciones informáticas denominadas GMAO (Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador). El procesamiento de datos y elaboración de informes de gestión técnicos y administrativos del mantenimiento, abren nuevos horizontes para reconocer el mantenimiento como una función industrial con entidad propia, más allá de un simple servicio. En esta línea, en los últimos años aparece un nuevo concepto Gestión de Activos (Asset Management), donde se involucran principios de gestión integral de activos extendida hacia la ingeniería y producción.

## **2.6.9 RCM, INICIO EN DÉCADA DE LOS 70**

Probablemente el modelo más avanzado en el contexto del proceso de mantenimiento es el de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM), que nace en los años 70 en la

industria aeronáutica civil de EE.UU. A raíz de una iniciativa de viabilidad económica, el avión comercial más grande del mundo (Boing-747) que según los preceptos de Mantenimiento Planificado, válido para las aeronaves hasta entonces exigía excesivos costes y tiempos de mantenimiento de B-747 que cuestionaba su rentabilidad. A raíz de los estudios realizados, se elaboró una metodología que ofrecía una reducción selectiva de tareas de mantenimiento sin poner en peligro la fiabilidad y seguridad del aparato.

Dicha metodología, que luego fue perfeccionada por John Moubray, consiste en aplicar el conocido método de AMFEC (Análisis Modal de Fallos Efectos y Criticidad) aplicado al diseño y proceso en la industria, ampliándolo en la valoración de consecuencias. Se parte de las necesidades de cumplimiento de una misión por cierto activo expresado en términos de parámetro, preferiblemente medibles, luego se plantean posibles desviaciones de este cuadro paramétrico en términos de modos de fallos, luego se plantean los posibles efectos, consecuencias y su criticidad.

El RCM es un nuevo modelo de mantenimiento, es una metodología racional para determinar la integración óptima de los modelos conocidos de Mantenimiento Reactivo, Proactivo, Mejoras e incluso mantenimiento por detección de fallos ocultos; este enfoque representa un cambio radical en el desarrollo histórico del mantenimiento; porque antes del RCM, el Preventivo y Planificado se centraba en los activos y el RCM se centra en las ubicaciones y procesos productivos. Antes el Mantenimiento Preventivo, por ejemplo de una bomba era clónico independientemente de la función y el proceso donde interviniese. Ahora el mismo activo tiene distintas aplicaciones y frecuencias de intervenciones de mantenimiento dependiendo de la criticidad del proceso donde intervenga.

## **2.6.10 ACTUALIDAD**

El escenario actual de mantenimiento económicamente rentable, se sustenta en el mantenimiento autónomo en el sector manufacturero y Mantenimiento Planificado como su complemento obligatorio. En el sector de procesos, la baza principal es el Mantenimiento Proactivo, basado en las intervenciones planificadas que emanan de las gamas del Preventivo y rutas del Predictivo, todo ello en ámbito tecnológico.

En el ámbito administrativo y económico, el Proceso de Mantenimiento es equiparable a los demás procesos del área industrial y en un futuro deberá tener la propia cuenta de resultados; es decir, no ser considerado solo como un centro de coste (o varios), sino también un centro de beneficios.



## 3

# ESTADO DEL ARTE

### 3.1 OBJETIVOS

Uno de los objetivos del estado del arte, es presentar y definir brevemente algunos métodos utilizados para la gestión de activos en entornos industriales. El objetivo es presentar el RCM, definiendo la necesidades de criticidades, AMFEC y NPR; Mantenimiento Preventivo, expresando la necesidad de estructurar las actividades de mantenimiento en planes y Mantenimiento Predictivo, que se define; indicadores de gestión (KPI's), indicando la necesidad de controlar las incidencias y costes asociados. Para el TPM (Total Productive Manintenance (Mantenimiento Productivo Total)) y el LCC (Life Cycle Cost (Coste del Ciclo de Vida)), el objetivo es definirlos en el estado del arte, pero no van a intervenir más en el desarrollo de la tesis doctoral, se definen a modo de interés del lector para que tenga conocimiento de dichos métodos.

Otro de los objetivos es mostrar las publicaciones del autor de la tesis doctoral, para que se muestre que el presente estudio lo soportan varias publicaciones nacionales e internacionales.

Los métodos hallados en las referencias bibliográficas ayudan a comprender la organización y funcionamiento de los departamentos de producción y mantenimiento, sus necesidades y sus objetivos. Pero, existe un vacío en la definición de un método para la demostración práctica de las ineficiencias productivas causadas por fallos en equipos o sistemas y la forma de presentar dichos resultados que haga trabajar en equipo a los dos departamentos. Se encuentra a faltar una metodología práctica que

relacione los modos de fallos de sistemas y equipos, con la cantidad de aparición de los fallos y su coste económico. De aquí, la estructuración del estado del arte en los objetivos comentados inicialmente en este capítulo.

### **3.2 RCM ((RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE) MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA FIABILIDAD))**

[13], [15], [26], [30], [35], [46], [57], [63], [64], [65], [66], [67], [69], [75], [78], [79], [82], [87], [88], [89], [90], [91], [105], [109], [111], [117], [124], [128], [136], [144], [148], [150], [152], [165], [176], [187], [191], [193], [194], [199], [201], [205], [209], [211], [214], [217], [227], [229], [230], [231], [232], [237], [258].

Como muy bien define Moubray [175] y [176] y August [12] y [13] el RCM es una metodología para determinar las actividades de mantenimiento, reactivas y proactivas, con objeto de optimizar la fiabilidad de los activos industriales, minimizando los fallos operacionales y/o sus consecuencias para la seguridad y medio ambiente, calidad, producción y mantenimiento de las instalaciones industriales. Se trata de un análisis inductivo/deductivo que de hecho todos hacen intuitivamente, en mayor o menor medida, en un ámbito industrial. La diferencia es que con esta metodología se “sistematiza el pensamiento” para evitar omisiones, prejuicios o juicios precipitados, conclusiones prematuras, falta de detalle y rigor y otras deficiencias que surgen de la fiabilidad limitada de un análisis no sistemático.

El método RCM basa sus modelos y teorías aplicables de forma genérica para cualquier tipo industria; pero, hace referencia a partes del sistema de gestión de mantenimiento o no hacen una profundidad exhaustiva del tipo de maquinaria y actuación para cada tipo de industria. Las necesidades y deficiencias encontradas en el sistema RCM para poder implantar este método en industrias de proceso se indican en los siguientes apartados del subcapítulo 3.2.

### 3.2.1 CÁLCULO DE CRITICIDADES

[34], [44], [59], [181].

El método contempla varios aspectos operativos como pueden ser seguridad y medio ambiente, calidad, producción y mantenimiento; varios niveles de impacto, que pueden ser 4; con lo que se utiliza una matriz de 4x4 para calcular la criticidad de plantas, procesos, subprocesos y equipos. Ello, es insuficiente para plasmar la complejidad del funcionamiento de las instalaciones de proceso, ya que en lugar de tender a obtener unos resultados objetivos, se obtienen unos resultados superficiales y subjetivos a la valoración de la criticidad de las instalaciones.

Se vislumbra la necesidad de tomar toda la instalación como un conjunto y definir una cantidad de variables que participan con el activo, no solo variables de diseño y proceso (temperatura, presión, caudal, intensidad, tensión, productividad, fluido, reacción, almacenaje,...) sino también comerciales, calidad, legales, variables de disponibilidad,... (Satisfacción del cliente, valor producto, ISO 14000, ATEX, intercambiable, recambios disponibles en almacén, previsión futura del producto,...).

### 3.2.2 AMFEC (ANÁLISIS DE MODOS DE FALLOS EFECTOS Y CRITICIDAD)

[10], [12], [21], [36], [51], [53], [60], [61], [92], [110], [113], [125], [127], [143], [154], [164], [166], [171], [173], [183], [188], [195], [196], [197], [198], [202], [216], [218], [226], [240], [249].

AMFEC es la parte de RCM, expresado mediante una hoja, que determina todos los fallos que pueden surgir en el funcionamiento de un activo, así como su impacto en seguridad y medio ambiente, calidad, producción y mantenimiento. Posibilita asimismo una valoración de cada uno de estos fallos y cuantificarlos con un número que agrupa dicha valoración, llamado *Número de Ponderación del Riesgo (NPR)*.

La realización de una hoja AMFEC de un activo es costosa en tiempo. Cuando se llega a una cantidad de aplicación de hojas AMFEC de equipos, se tiene del orden de un 90 % de todos los posibles modos de fallos que ocurren en un centro industrial o

---

productivo. Por tanto, existe la necesidad de crear bases de datos de modos de fallos tipo de industrias de proceso, para minimizar el tiempo de realización de la hoja AMFEC de un equipo. Siendo el tiempo aplicado para definir:

- Función proceso
- Parámetros
- Fallos funcionales
- Modos de fallos específicos a la localización del equipo
- Efectos y consecuencias características
- Impacto en seguridad, medio ambiente, calidad, producción y mantenimiento

### 3.2.3 NPR (NÚMERO DEL PONDERACIÓN DEL RIESGO)

[106], [120], [132], [210].

El Número de Ponderación del Riesgo (NPR) lo forman tres elementos:

- **Gravedad:** Define la gravedad de los efectos ocurridos si sucede el fallo en la máquina o instalación de estudio.
- **Frecuencia de Fallos:** Número de sucesos ocurridos en un intervalo de tiempo.
- **Detectabilidad:** Mayor o menor facilidad de detectar una causa de fallo según recursos humanos y técnicos disponibles

Se multiplican los valores de Gravedad x Frecuencia de Fallo x Detectabilidad y se obtiene el NPR para cada modo de fallo. Su utilidad consiste en alertar en menor o mayor medida al analista a reforzar los métodos de mantenimiento. Cada parte del NPR se pondera del 1 al 10 según la importancia; por tanto el NPR va desde 1 hasta 1000.

En la propia operativa de utilización de la herramienta RCM, surge la necesidad de poder agrupar los órdenes de magnitud de las frecuencias de fallos por tipos equipos. Por ejemplo un rodamiento se puede cambiar cada 6 meses, o un engrase se debe realizar una vez al mes en una máquina rotativa (grupo motor-bomba) y en cambio,

una fuga en la tubuladura de un intercambiador de calor provocada por la corrosión del vapor que circula por ella, puede surgir al cabo de unos 10 años; con lo que estas frecuencias de fallos no son comparables y medibles bajo la misma regla. Ya que se encuentra dificultad en llegar a valores de NPR altos debido a que la frecuencia de fallos es muy variable. Una fuga de amoniaco que ocurre cada 10 años, tiene un valor de frecuencia de fallos 2, detectabilidad 2 y gravedad 10, con lo que el  $NPR = 2 \times 2 \times 10 = 40$ ; siendo un fallo con consecuencias graves muy lejos del valor 1000. Con los ejemplos indicados, se vislumbra la oportunidad de crear valores de rangos de frecuencia de fallos diferentes para tipos de equipo, que haga equiparar la disparidad de tiempos de aparición de fallos entre tipos de equipo.

### **3.3 MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO**

#### **3.3.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO**

[2], [31], [39], [45], [52], [68], [103], [112], [135], [151], [184], [215], [220].

Es aquél que consiste en realizar ciertas reparaciones o cambios de piezas, al vencer un período de tiempo prefijado, con la finalidad de disminuir la probabilidad de daños y pérdidas de producción.

Dada la diversidad tecnológica de los equipos de las industrias, las publicaciones sobre Mantenimiento Preventivo se enfocan a tratar qué tipos de gamas preventivas (por frecuencia, por especialidad, por riesgo, por tipo de actuación,...) boletines de inspección,..., existen; pero, no se diseñan planes de Mantenimiento Preventivo con sus intervenciones, y sus frecuencias; así como, su coste asociado al plan. Por ello, se encuentra a faltar planes de Mantenimiento Preventivo para industrias de procesos.

#### **3.3.2 MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

[16], [19], [29], [55], [58], [73], [77], [93], [94], [118], [137], [147], [161], [170], [179], [182], [213], [225], [236], [246], [259].

Se trata de un Mantenimiento Preventivo realizado en base a un profundo conocimiento del estado real de las máquinas y sus componentes, analizando el comportamiento y funcionamiento de las mismas mediante controles sistemáticos periódicos o continuos y actuando cuando en los parámetros observados se detectan valores anormales.

### **3.4 KPI's (KEY PERFORMANCE INDICATORS). INDICADORES DE GESTIÓN**

[1], [3], [4], [5], [6],[7], [8],[9],[11],[14], [17], [18], [20], [22], [23], [24], [25],[27],[28], [32], [33], [37], [40],[41], [42],[43], [47], [48], [49], [50], [54], [56], [62], [70], [71], [72], [74], [76], [80], [81],[83], [84], [85], [86], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102],[104], [107], [108], [114], [115], [116], [119], [121],[122], [123], [126], [129], [130], [131], [133], [134], [138], [139], [140], [142], [145],[146], [149], [153], [155], [156], [157], [158], [159], [160], [162], [163], [167], [168], [169],[174], [175], [177], [178], [185], [186], [189], [190], [192], [200], [203], [204], [206],[207], [208], [219], [221], [222], [223], [233], [234], [235], [238], [239], [241], [242],[243], [244], [245], [247], [248], [250],[251], [253], [254], [255], [257], [260], [261], [262], [263], [264], [265].

Los indicadores de gestión ayudan a conocer la situación de departamentos de la empresa. En la época informatizada en la que vivimos es muy fácil tener acceso a grandes volúmenes de información que a su vez nos dan más información si se relaciona entre sí; pero, es muy importante conocer la que nos ayuda a dirigir y decidir sobre acciones en la empresa. Por ello, se han establecido numerosos indicadores de gestión tecnológicos, recursos humanos y materiales, económicos, de proactividad, etc. Lo más importante es diferenciar entre la información que ayuda a decidir y la que simplemente sirve para controlar, no dando ningún valor añadido y consumiendo recursos de forma innecesaria.

Se crea la necesidad de relacionar los indicadores de aparición del fallo y su coste económico, aplicado a diferentes tipos de equipos y para diferentes estados de implantación de Mantenimiento Proactivo. Para cubrir dicha deficiencia, se define la metodología en el apartado 5.

El tiempo medio entre averías sucesivas de un ítem reparable. Se representa como TMEF y es inverso a la tasa de fallos. El MTBF se aplica para un tipo de avería concreto y no se suele utilizar tipos de MTBF para tipos de averías distintas. Con ello, se encuentra a faltar tipologías de MTBF para diferentes tipos de equipos y valores de ellos mismos estableciéndose que valores son adecuados y cuáles no para industrias de proceso.

### **3.5 TPM (TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE (MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL))**

[38], [141], [172], [180], [212], [224], [228], [252], [256].

El TPM es un sistema de organización del mantenimiento que, aunque originado en EEUU, ha sido divulgado a partir de experiencias japonesas. Como comenta Nakajima el método TPM, además del mantenimiento, abarca otras áreas del sistema productivo y, básicamente, consiste en dividir las actuaciones de mantenimiento según el nivel de complejidad de las mismas, asignándose al personal de operación los niveles de menor contenido técnico y al personal de mantenimiento el resto de las actuaciones. A través de la mayor implicación con sus máquinas y equipos, se pretende una mejora de métodos, sistemas y rendimientos. En algunas ocasiones, se presenta erróneamente, como un sistema que suprime el mantenimiento. La aplicación del TPM no es viable en aquellas instalaciones altamente automatizadas en que el personal de operación no existe o está reducido a la mínima expresión.

### **3.6 LCC (LIFE CYCLE COST (COSTE DEL CICLO DE VIDA))**

El Coste de Ciclo de Vida (LCC) es una metodología que busca la minimización del coste de toda la vida de un sistema o equipo (minimización del Life Cycle Cost) y la maximización del cumplimiento de sus objetivos (maximización del beneficio). En consecuencia, en el LCC se deben considerar simultáneamente tanto el coste como la efectividad de un sistema o equipo ya desde su diseño conceptual. El LCC considera los costes de:

- Investigación y desarrollo del sistema.
- Manufacturación e instalación del sistema.
- Operación y mantenimiento.
- Retirada y eliminación.

### **3.7 PUBLICACIONES AUTOR TESIS**

#### **Hydrocarbon Processing**

- Managing costs and incidents in industrial plant equipment. January 2010. Pág. 55-61.

#### **Revista Calidad**

- Modelo de Gestión de Activos a través de Servicios de Mantenimiento para la Industria de Procesos. Julio / Agosto 2008. 16-21.

#### **Revista IGM (Ingeniería y Gestión de Mantenimiento) Editorial Alcion.**

- Desarrollo del Manual de Mantenimiento en el contexto de la Norma Internacional ISO 9000:2000. Enero/Febrero 2005.
- ISO 9000 / 2000 y su incidencia en el Proceso de Mantenimiento. Julio / Agosto 2005.
- Mejora del Método R.C.M. a partir del A.M.F.E.C. en Industrias Químicas (tres entregas). Noviembre / Diciembre 2005; Enero / Febrero 2006 y Marzo / Abril 2006.
- Incidencias en equipos de Plantas Químicas (dos entregas). Septiembre / Octubre 2006 y Noviembre / Diciembre 2006.
- Cuadro de Mando y Benchmarking. Septiembre / Octubre 2006.
- Juric, Z. Ed., Conde, R., Gardella, M., Gómez-Acebo, C., & Goti, A. GMAO Gestión del mantenimiento asistida por ordenador. Ingeniería y Gestión de MANTENIMIENTO [50], 57-62. 2006a.

### **IADAT e-2006 International Conference on Education**

- Maintenance Managers' Empowerment by using a Money Based RCM. Barcelona 12-14 de Julio de 2006.
- Operations improvement and operators empowerment by using a RCM oriented to lean-structured companies. Barcelona 12-14 de Julio de 2006.

### **IADAT Journal of Advanced Technology**

- Gardella, M. & Goti, A. 2006, "Maintenance managers' empowerment by using a Money Based RCM".

### **Maintenance Technology**

- Goti, A., Egaña, M. M., Iturritxa, A., & Gardella, M. 2008, "RCM For Small- To Medium-Sized and Lean Organizations". December, pp. 13-17.

### **VIII, IX, X y XI Congreso de Confiabilidad. II Jornadas Iberoamericanas de Asset Management.**

- Implantación y Gestión de Mantenimiento Preventivo en la Industria Química a través de RCM. Madrid (España) 29-30 de Noviembre de 2006.
- Parametrización del número de ponderación del riesgo para el desarrollo de AMFEC's variables. San Sebastián (España) 28-29 de Noviembre de 2007.
- Modelos de Gestión de Activos a través de servicios de Mantenimiento para Industria de Procesos. Lleida (España) 26-27 de Noviembre 2008.
- Gestión de proveedores de servicios y materiales para Mantenimiento en la Industria de Procesos. Valencia 3-4 (España) 3-4 de Junio de 2009.

### **Revista electrónica PMM Institute for Learning**

- Implantación y Gestión de Mantenimiento Preventivo en la Industria Química a través de RCM. Enero 2007.

### **3.8 CONCLUSIONES**

Se ha descrito brevemente la filosofía del RCM, con sus secciones criticidad, AMFEC y NPR; se ha definido el Mantenimiento Preventivo y Predictivo e indicadores de gestión. A todos estos métodos se les ha encontrado necesidades de desarrollo de algunas de sus partes, para facilitar la implantación de la gestión de activos en industrias de procesos.

Definiendo los métodos TPM y LCC, se ha ilustrado al lector de otras formas de gestión de activos que actualmente se utilizan.

Mostrando las publicaciones del autor de la tesis, se ha constatado que el estudio de investigación desarrollado ha sido validado por revistas e instituciones dedicadas a la gestión de activos, y mostrado el interés de ellas por las aportaciones de la tesis.

## 4

# DEFINICIÓN DEL MÉTODO RCM EN LA ACTUALIDAD

## 4.1 OBJETIVOS

El capítulo 4 de la presente tesis, define la metodología RCM que es muy bien utilizada en muchas empresas de industria de procesos. Con esta definición, se establece la base de donde emana las aportaciones de la tesis, ya que son mejoras a dicha metodología. El trabajo de desarrollo de RCM ha sido realizado con mayor difusión por John Moubray, al cual se hace referencia en este capítulo.

Un objetivo del capítulo es mostrar las 7 preguntas del método RCM definido por Moubray, para determinar las funciones, fallos funcionales, efectos de los fallos, consecuencias de los fallos, valoración de los fallos y actividades que se pueden realizar para prevenir dichos fallos; de los activos o sistemas a los que se les aplica RCM.

Para poder aclarar los pasos del RCM, se mostrarán ejemplos prácticos de ejecución de los 7 pasos del RCM, a activos de una planta de procesos.

Interesante es que también se muestren otras metodologías, que tienen por objetivo implantar modelos de gestión de activos, con el objetivo de optimizar recursos para

lograr los mejores resultados en predecir y prevenir fallos, y controlar los costes asociados. Para ello, se muestra la estrategia SAMI (Strategic Asset Management Inc) y el modelo BMM (Business Maintenance Model) de Asset Management de PMM Institute For Learning. También, se definirá un modelo de implantación de Mantenimiento Preventivo y Predictivo, diseñado por el autor de la tesis.

## 4.2 INTRODUCCIÓN

En la aplicación del método RCM (Reliability Centered Maintenance (Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad)), la parte de AMFEC (Análisis de Modos de Fallos Efectos y Criticidad) es una metodología bien establecida desde antes del RCM y de hecho se utiliza en la Ingeniería de Diseño y de Procesos para optimizar las instalaciones desde hace años. Su aportación principal es la valoración de riesgos (NPR). Con ello, se consigue analizar todas las causas que provocan un daño en una máquina o instalación. De muy buena ayuda ha servido esta herramienta analítica, para plantear las bases de una correcta actuación de los departamentos de mantenimiento de muchas industrias.

Se puede llegar a dimensionar, la causa o causas que provocan cualquier fenómeno físico o químico en cualquier máquina, instalación o proceso productivo, puede ser estudiado y analizado desde varios niveles de precisión y detalle.

- a- **Visión generalista:** En una planta industrial está parada por indisponibilidad de las instalaciones, sin saber muy bien el motivo de esta parada.
  
- b- **Visión detallada:** El retén que separa el circuito de refrigeración del de vehiculación de vapor de la bomba de la caldera, que suministra vapor a todas las plantas de proceso; tiene una rigidez provocada por envejecimiento o fatiga, el cual le ha hecho perder sus propiedades elásticas. Esto ha provocado un calentamiento progresivo de la bomba; así como, sus rodamientos, en los cuales se ha perdido una calidad de lubricación (perdiendo viscosidad el aceite a causa del aumento de temperatura) y provocando un gripaje de los mismos, provocando una parada de la bomba, caldera y en consecuencia suministro de vapor a todos los procesos de la planta industrial, que en este caso está parada por indisponibilidad de las instalaciones, comentado anteriormente.

- c- **Visión microscópica:** Variación de las fuerzas moleculares de la cadena polimérica del material del retén de la bomba, en función de una variación de un grado celsius de temperatura o un ciclo de compresión-descompresión del material.

El objetivo de la aplicación del método RCM, es conseguir descubrir y analizar las causas más detalladas, en el caso comentado anteriormente, cada cuanto se debe cambiar el retén de la bomba antes de que pierda sus propiedades elásticas, teniendo en cuenta su degradación en función del tiempo, fatiga mecánica y térmica debido a que es un material polimérico. Esto es una simple explicación del grado de magnitud de detalle, que se necesita conocer de las causas de fallos en equipos para utilizar la herramienta método RCM. Pero, como deben haber comprobado los lectores, se les ocurren enésimos detalles y comportamientos físicos y químicos que ocurren en diferentes equipos, máquinas o instalaciones de las industrias donde trabajan.

Como se llegaría al absurdo de llegar al detalle microscópico del análisis de causas de fallos (punto c), se queda en el detalle en el cual se comenta que el retén de la bomba esta rigidizado e inservible (punto b). Aun así, llegando a este nivel de detalle, la aplicación del análisis de causas de fallos, para cada máquina necesita de un gran esfuerzo de varios técnicos e ingenieros; porque a cada máquina se debe estudiar su comportamiento desde el principio, con los consecuentes costes asociados.

Lo que se propone, es el análisis de varias máquinas e instalaciones, que engloben la mayor parte de las tecnologías aplicadas en una industria, descubriendo y analizando las causas de fallos; así como, ponderando sus criticidades, detectabilidades y gravedades. Con lo que se desarrolle un sistema parametrizado de análisis de causas de fallos e intervenciones de mantenimiento, necesarias para tener un óptimo comportamiento de máquinas e instalaciones, con las consecuentes reducciones de costes asociados.

### **4.3 LAS 7 PREGUNTAS BÁSICAS PARA LA IMPLANTACIÓN DE RCM [JOHN MOUBRAY]**

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de funcionamiento en la ubicación operativa?

2. ¿Cómo se puede dejar de cumplir las funciones?
3. ¿Qué puede originar cada fallo funcional?
4. ¿Qué efectos provocan los fallos?
5. ¿Qué consecuencias provocan los fallos?
6. ¿Qué valoración tienen los fallos?
7. ¿Qué actividades se pueden realizar para prevenir o evitar que aparezcan los fallos?

### **4.3.1 FUNCIONES Y ESTÁNDARES DE FUNCIONAMIENTO EN LA UBICACIÓN OPERATIVA**

La primera pregunta en la secuencia metodológica del RCM es: ¿Cuáles son las funciones y estándares de funcionamiento en la ubicación operativa?, dicho de otro modo ¿Para qué sirve el activo bajo estudio? Hay que definir, de manera concisa la función primaria del activo, pero también funciones secundarias relevantes. Por ejemplo, la función de una bomba es transportar fluidos, pero también es contener líquido, aunque aparentemente esto sea secundario; cuando se manejan productos tóxicos, explosivos y peligrosos en general, la estanqueidad puede ser más importante que sus características funcionales primarias.

Si se bombea agua en un entorno sin peligro, las fugas por el cierre mecánico pueden ser un fallo funcional de segundo o tercer orden de importancia, al fin y al cabo es una pérdida energética, mientras tenemos caudal y presión satisfactorios, no es preocupante.

Si la bomba transporta alguna sustancia peligrosa, seguridad e impacto ambiental, una fuga puede ser un fallo funcional de primerísimo orden de importancia. Hay que ser muy incisivo en este primer paso, ya que si aquí se omite algo, el análisis será incompleto. Otro ejemplo: un calorifugado tiene como función primaria el aislamiento térmico, una cuestión de economía energética; no obstante, la protección de personas puede ser igual o más importante. Incluso funciones aparentemente disparatadas como declarar la función de “no caerse” para un activo, puede ser relevante en

algunos casos, tratándose de situaciones de gran riesgo (aun con probabilidades de ocurrencia bajas). Lo importante es efectuar una “tormenta de ideas”, donde varios participantes puedan hacer aflorar las funciones primarias o secundarias desde diversos puntos de vista. Claro está, este desglose tiene un límite racional, por ello se requiere de sentido común y experiencia. No efectuaremos una revisión anual de la mecánica de suelos de un edificio de oficinas en una zona normal donde nunca ha habido terremotos. Sería una “Gama Preventiva” irracional. ¿Pero qué tal una Planta Nuclear en California? Seguramente que cambia de sentido. Intuitivamente pensamos en la probabilidad y en las consecuencias.

Acto seguido hay que asociar parámetros a las funciones, cuantitativos, de ser posible refiriéndose a los parámetros relevantes de proceso, por ejemplo:

- **Variables termodinámicas:** presión, temperatura, caudal, densidad, humedad relativa.
- **Variables químicas:** pureza, ph, % mezcla.
- **Variables mecánicas o dimensionales:** espesores, niveles de vibración permitidos, desalineación / desnivelación.
- **Variables acústicas:** nivel de presión sonora
- **Variaciones permitidas de cierto parámetro:** pulsaciones de presión, diferencial de temperatura.

Cuanto mejor definido o parametrizado sea el funcionamiento, la secuencia del análisis RCM será más directa y la selección del tipo de mantenimiento adecuado más fácil. En este lugar hay que destacar el aspecto tal vez más importante de la filosofía RCM: los parámetros de proceso que describan las funciones del activo bajo estudio, tienen que ser valores que debe cumplir el activo, no los que puede dar. No confundir la demanda con la capacidad de proceso.

PARÁMETROS O DESCRIPTORES DEL PROCESO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
<b>Múltiples</b>	Varios parámetros que describen el funcionamiento	Calentar 2 Ton de un producto a 126°C en 1 hora.
<b>Cuantitativos</b>	Todo valor de operación. Si no se conoce, no se podrá exigir al Mantenimiento que lo garantice.	Cualquier magnitud física relevante (p, t, caudal, etc.)
<b>Cualitativos</b>	Algunas veces no se puede cuantificar	Respuestas: "ACEPTABLE" o así
<b>Absolutos</b>	Se aplica a alguna condición imprescindible	Típico para bombas o depósitos: "contener líquido" o similar
<b>Variables</b>	Se refiere a una "ventana de funcionamiento"	P.e.: "la bomba debe dar entre 1000 y 2000 l/h"
<b>Máximo / mínimo</b>	Variaciones dentro de un rango cualitativo	Por ejemplo: "asegurar el máximo nivel posible"

Tabla 4.1- Ejemplos de parámetros

### 4.3.2 FALLOS FUNCIONALES

La segunda pregunta en la secuencia metodológica del RCM es: ¿Cómo se puede dejar de cumplir las funciones? Es evidente que cualquier desviación operativa del activo de las funciones previamente bien definidas y parametrizadas, constituye un Fallo Funcional. He aquí una gran diferencia del enfoque tradicional del mantenimiento que es sensible a la avería, cese total de función.

En una cultura esencialmente reactiva, el nivel de negligencia es alto y se empieza a reaccionar cuando, en muchas ocasiones, los daños y perjuicios ya se han experimentado. Una necesaria sutileza de observación, debe ser reflejada en los procedimientos operativos del Mantenimiento Preventivo, claro está, según los niveles de criticidad.

Si una bomba no da caudal ó presión exactamente según lo especificado en Funciones y Parámetros de Proceso (4.3.1), es un caso anómalo al que habrá que

hacer frente en los pasos subsiguientes del análisis RCM. Por ello hay que recalcar nuevamente que una exhaustiva descripción del paso número 1 (4.3.1) del método, es la clave para determinar qué es un Fallo Funcional. Si se define que la función de una bomba es “suministrar fluido”, sin más, toda fuga, variaciones de presión, caudal, etc. no serán considerados fallos y serán omitidos de los siguientes puntos del método.

Otro detalle a destacar es que la definición del fallo funcional debe, en lo posible, declararse en términos cuantitativos, refiriéndose a los parámetros funcionales. Por ejemplo, si la bomba en cuestión debe suministrar un fluido a 10 bar de presión, tanto se considera fallo funcional si la presión observada es mayor, como si es menor de la especificada, luego los análisis pueden o no tener el mismo cauce y métodos de solución. Tampoco serán de misma gravedad y riesgo.

Si la presión es mayor de la especificada, algo puede explosionar, reventar, etc. (o no necesariamente, porque algún procesista puede decir que a lo mejor es más crítico un fallo funcional que la presión baje porque las condiciones de vacío en el sistema, pueden provocar una entrada de aire exterior, que luego puede formar una mezcla explosiva con el producto bombeado).

Se subraya la necesidad de enfoque multidisciplinar, máxima creatividad e imaginación, ausencia de un enfoque de burocracia rutinaria.

El concepto de Riesgo debe ser bien comprendido en la metodología RCM, sin tampoco exagerar ni ser demasiado precavido, porque esto conllevaría la irracionalidad del método. En todos los pasos del RCM surgen dudas de tipo cuantitativo “¿cuánto mucho es mucho?”. Por ello hay que consensuar, debatir, confrontar constructivamente las opiniones y obtener una conclusión dentro de lo razonable. El RCM no es infalible. Es un proceso vivo.

FALLOS FUNCIONALES	DESCRIPCIÓN
Fallos parciales o totales	Funciona completamente o no funciona Funciona parcialmente, incumpliendo alguno de los parámetros de proceso
Límites superiores o inferiores	Salida de cualquier parámetro de proceso fuera de las horquillas o tolerancias aceptables
Fallos de “falseo”	Asociado a la instrumentación – indicadores de cuadros de control y similares, donde fallo de <i>display</i> puede ser verdadero o falso
Fallos funcionales en el contexto operacional	Ejemplo: una bomba tiene capacidad nominal para entregar 100 l/min. Por alguna razón, esta <b>capacidad</b> está limitada a 90 l/min. Se coloca la bomba en un proceso que <b>demanda</b> 85 l/min. No hay fallo funcional. Si se coloca la bomba en otro proceso que <b>demanda</b> 95 l/min, sí hay fallo funcional. En ambos casos “se contaba” con el dato técnico de capacidad máxima de la bomba.

Tabla 4.2- Familias de Fallos Funcionales frecuentes

### 4.3.3 MODOS DE FALLOS

La tercera pregunta en la secuencia metodológica del RCM es: ¿Qué puede originar cada fallo funcional? Es, sin duda alguna, el paso más técnico de toda la secuencia del RCM. Se trata de encontrar las causas más probables para cada fallo funcional.

En este paso hay que aunar los esfuerzos de distintos participantes expertos en diversas áreas, mecánica, eléctrica, instrumentación, control, etc.

El tema no es trivial en absoluto, porque algunas causas (modos de fallo) son manifestaciones (síntomas) de unos males más profundos o elementales. Por ejemplo, si como fallo funcional declaramos en la bomba en cuestión “presión menor de 10 bar”, suponiendo que el parámetro de proceso correcto son los 10 bar.

Los modos de fallo pueden ser diferentes; si se establece como modo de fallo (causa) “avería de bomba” y como la “causa de esta causa” desgaste de rodete, y luego en el siguiente “ejercicio de profundización”, causa de esta causa”, cavitación (puede haber

otras dos causas de raíz, abrasión o corrosión), la problemática es diferente. Si la causa más primitiva es la cavitación, probablemente se trata de un fallo de ingeniería debido al cálculo incorrecto de "NPSH" o algún estrangulamiento en la succión o también temperatura de evaporación del líquido más baja etc.; si la causa primitiva es la corrosión, la cuestión es de un material inadecuado para el fluido que se maneja; si la cuestión de raíz es la abrasión, pueden haberse mezclado con el fluido algunos sólidos en forma de contaminante.

Sea lo que sea, el tratamiento que propondrá el RCM en el análisis subsiguiente será diferente, no es lo mismo que a la hora de plantear métodos de fiabilización del activo se plantee una revisión por ingeniería de los materiales, que una gama de verificación diaria de temperatura de fluido o una mejora, poniendo un filtro para controlar la entrada de arenilla a la bomba con el fin de impedir la abrasión. Un mismo modo de fallo (causa) visto superficialmente no revelaría estas diferencias. Ahondando, se llega a mayor profundidad.

Por ello, tal y como se sugiere en la "Hoja de AMFEC" en este documento, es recomendable subdividir la columna de modos de fallo en tres niveles: nivel A, nivel B, nivel C; por supuesto, no necesariamente hay que desglosar siempre hasta el tercer nivel; también a veces, la complejidad es tal que no basta profundizar a tres niveles. Es lo más engorroso del RCM.

Por experiencia, se ha observado que en este punto empiezan las divergencias entre las áreas industriales implicadas: los de producción tienden a "echar la culpa" a los de mantenimiento, señalando causas de "averías clásicas", del dominio mecánico o eléctrico, a la vez que se olvidan que hay muchas causas (modos de fallo) originadas por una maniobra errónea, una práctica operativa inadecuada del personal de producción y similares. También los de mantenimiento tienden a llegar a raíz del problema buscando en la mayoría de los casos fallos provenientes de diseño, "el culpable es ingeniería". No hay que olvidar que el RCM, en primera instancia debe dotar de métodos de mantenimiento eficaz a una instalación existente tal cual. Por supuesto, si en uno de los pasos siguientes se observa una necesidad imperante e ineludible de reformar algo, habrá que tener en cuenta que el mantenimiento por reformas o modificativo también entra en este conjunto de métodos proactivos, pero siempre y cuando sea imprescindible.

Para facilitar el progreso en este crítico paso del RCM, que suele ser un auténtico escollo y donde se consume la mayor parte del tiempo de análisis y por lo que muchos han desistido declarando el RCM demasiado engorroso, se recomienda:

- Considerar como caso de clasificación nivel A, fallos de los activos a nivel general, por ejemplo: fallo motor, fallo bomba, fallo variador, fallo instalación, fallo depósito etc.
- La clasificación a nivel B desglosa el nivel A en componentes y elementos. En el caso de una bomba, serían: fallo de rodamiento, fallo de empaquetadura o cierre mecánico, sobrecalentamiento, devanados etc.
- La clasificación a nivel C, si precisa, descendería aun más: mal montaje de rodamientos, fallo de lubricación, entrada de suciedad, humedad, rotura por desgaste o fatiga; también hay que salirse a veces de la tesitura técnica, puede ser fallo de maniobra; válvula accidentalmente cerrada, etc.

En la siguiente tabla se presenta el caso de Modos de Fallo de un motor de velocidad variable desglosado a tres niveles:

<b>MODOS DE FALLO</b>		
<b>CLASIFICACIÓN NIVEL A</b>	<b>CLASIFICACIÓN NIVEL B</b>	<b>CLASIFICACIÓN NIVEL C</b>
Fallo variador	Por regulación	
	Por potencia	
Fallo motor	Rotura eje	
	Fallo rodamientos	Mal montaje
		Fallo de lubricación
		Entrada de suciedad / agua
Sobrecalentamiento	Suciedad en las aletas de enfriamiento de la carcasa del motor	

Tabla 4.3- Modos de fallos de un motor con variador de velocidad

#### 4.3.4 EFECTOS DE FALLO

La cuarta pregunta en la secuencia metodológica del RCM es: ¿Qué efectos provocan los fallos? Se refiere a los efectos de cada uno de los modos de fallos.

No confundir con las consecuencias de fallo. Los efectos de fallo responden a la pregunta ¿qué ocurre?, mientras las consecuencias de fallo responden a la pregunta ¿qué tanto importa el efecto?

Cuando se rellena el formato de AMFEC, en la columna efectos de fallo hay que anotar de manera concisa:

- ¿Cuál es la evidencia (si existe) del fallo ocurrido?
- ¿De qué manera (si procede), el fallo amenaza la seguridad y medio ambiente?
- ¿De qué manera (si procede) afecta la producción y operaciones en general, o si origina daños secundarios?
- ¿Qué daño físico (si alguno) origina en el sistema?
- ¿Qué dificultades (si alguna) habrá para reparar el daño a mantenimiento?

#### 4.3.5 CONSECUENCIAS DE FALLO

La quinta pregunta en la secuencia metodológica del RCM es: ¿Qué consecuencias provocan los fallos? Es la mayor contribución del RCM, más allá del análisis AMFEC. La gestión de consecuencias de fallos, representa más que la simple predicción, prevención o mejora en sí. Es decir, puede matizarse la anterior pregunta: ¿qué secuela práctica tendría el fallo si no se hiciera nada para detectar, predecir o prevenirlo? El Mantenimiento Proactivo moderno, está dirigido hacia la eliminación o disminución de consecuencias negativas de fallos, más que hacia la prevención de los mismos.

En la metodología RCM suelen subdividirse las consecuencias de fallos en las siguientes categorías:

1. Seguridad y medio ambiente.
2. Impacto en la producción.
3. Impacto en el mantenimiento.
4. Fallo oculto (no evidente para el personal operativo en condiciones normales).
5. Consecuencias no operacionales.

El fallo de una bomba que suministra el agua a un poblado falla. Su efecto es que la gente se quede sin agua. La consecuencia puede ser que el alcalde sea destituido. Si falla un proceso productivo, el efecto es no suministrar al cliente a tiempo; la consecuencia puede ser la pérdida del cliente. La valoración de consecuencias en términos económicos, en términos de coste de oportunidad, seguridad, etc. puede incrementar la importancia de un pequeño fallo enormemente.

### **4.3.6 VALORACIÓN DE CADA FALLO**

A cada modo de fallo hay que asignar un Número de Ponderación de Riesgo (NPR) que conducirá al analista en la selección adecuada de métodos de predicción, prevención o detección de fallos y también las necesidades de mejora. Es la típica valoración de un AMFEC, tanto de proceso como de diseño, aunque en el caso de RCM está orientado hacia el control de fallos y/o sus consecuencias.

#### **4.3.6.1 GRAVEDAD**

Valor 1: Las consecuencias del fallo son despreciables. Ninguna trascendencia para la seguridad y afines, producción y calidad. Eventualmente pueden tener alguna mínima consecuencia para el coste directo del Mantenimiento.

Valor 2 y 3: No hay consecuencias para seguridad y afines, producción y calidad; puede tener alguna consecuencia baja o moderada para los costes directos del mantenimiento.

Valor 4, 5 o 6: Los efectos tienen consecuencia importante en los costes directos del mantenimiento y una pequeña influencia adversa en la producción y/o calidad, pudiendo causar paradas cortas no programadas, ciertas mermas o rechazo de calidad. Pueden causar pequeños fallos secundarios ocultos de poca importancia. Ninguna influencia en la seguridad y medio ambiente.

Valor 7 y 8: Importante impacto del efecto de fallo en la producción y/o calidad y/o elevados costes directos de mantenimiento. También se consideran en este rango importantes fallos en cadena ocultos. Se consideran también pequeños o moderados efectos negativos para la seguridad y afines.

Valor 9 y 10: Se trata de graves consecuencias para seguridad y afines. También entran interrupciones muy costosas por concepto de impacto en la producción y/o calidad.

#### **4.3.6.2 FRECUENCIA DE FALLO**

Si se dispone de datos históricos, pueden analizarse los MTBF. Pueden hacerse análisis tipo Weibull u otros, en casos muy críticos. También pueden ayudar los datos del fabricante. En la mayoría de los casos ocurridos se aplica la estimación por experiencia.

Valor 1: Tasa de fallos: menos de 1 en más de 10 años.

Valor 2: Tasa de fallos: entre 1 y 3 en más de 10 años.

Valor 3: Tasa de fallos: entre 1 y 3 en 10 años.

Valor 4: Tasa de fallos: entre 1 y 3 en 5 años.

Valor 5: Tasa de fallos: entre 1 y 3 en 2 años.

Valor 6: Tasa de fallos: entre 1 y 3 por año.

Valor 7: Tasa de fallos: entre 1 y 3 cada seis meses.

Valor 8: Tasa de fallos: entre 1 y 3 cada dos meses.

Valor 9: Tasa de fallos: entre 1 y 3 cada semana.

Valor 10: Tasa de fallos: entre 1 y 3 por día.

#### **4.3.6.3 DETECTABILIDAD**

Este aspecto es uno de los principales méritos del RCM. Hasta un 40% de fallos en una industria de procesos altamente automatizada son de tipo oculto. Además, el diagnóstico acapara hasta un 80% del tiempo total de reparación. Por lo tanto, actualmente más de un tercio de actividades de mantenimiento pueden canalizarse hacia el diagnóstico de fallos ocultos.

Un Mantenimiento Preventivo tradicional en raras ocasiones plantea necesidad de búsqueda y detección de fallos ocultos, secundarios, ocurridos por un fallo reparado en precario o por el falseo de la indicación (sistemas de seguridad, aviso, alarma etc. tienen su propia fiabilidad). El tema de la detectabilidad es la clave para seleccionar correctamente el método de mantenimiento.

Valor 1: No hay ninguna duda de que el fallo será detectado de inmediato, por cualquier persona y sin ambigüedad.

Valor 2: La detección es prácticamente certera. Probablemente habrá que verla algún técnico u operario especializado.

Valor 3, 4, 5: La detección es razonablemente fiable. Hay que aplicar algún método, técnica o instrumento y/o tardar algún tiempo en diagnosticar definitivamente.

Valor 6, 7, 8: La detección entraña riesgos de no acertar, se necesitan medios y tiempo relativamente largo para diagnosticar el fallo.

Valor 9 y 10: La detección es extremadamente difícil, o prácticamente inviable en las condiciones tecnológicas actuales.

#### **4.3.6.4 NÚMERO DE PONDERACIÓN DE RIESGO (NPR)**

Se multiplican los valores de Gravedad x Frecuencia de Fallo x Detectabilidad y se obtiene el NPR para cada modo de fallo. Su utilidad consiste en alertar en menor o mayor medida al analista a reforzar los métodos de mantenimiento. Aunque no es necesario cuantificar cuánto mantenimiento es necesario para cada nivel de NPR, la influencia de un mayor NPR puede requerir de:

- Mejoras constructivas para favorecer la detectabilidad.
- Mayor número de métodos cruzados para el diagnóstico técnico o Mantenimiento Predictivo (mayor fiabilidad de diagnóstico).
- Gamas preventivas más exhaustivas y/o frecuentes.
- Materiales y elementos de máquinas de mayor calidad.
- Etc.

### **4.3.7 ACTIVIDADES PROACTIVAS PARA PREVENIR LOS FALLOS**

Una vez se han analizado las causas y efectos de las causas de fallos provocados en máquinas e instalaciones y ponderado el riesgo, se debe responder a la pregunta ¿Qué actividades se pueden realizar para prevenir o evitar que aparezcan los fallos? Lo que se pretende es prevenir el efecto y que las repercusiones a la seguridad, medio ambiente, calidad del producto, indisponibilidad de instalaciones por paradas de máquinas (producción) y mantenimiento realizado, sean las mínimas. Con todo ello, una buena implantación del sistema descrito lleva a una reducción de costes, que es la base de la filosofía de la implantación del Mantenimiento Proactivo.

Se recomienda establecer un código auxiliar de modos de fallo; así como, de las actividades de mantenimiento por realizar.

Del algoritmo RCM siguiente, ver figura 4.1, puede concluirse cuál es la práctica de control de fallos y sus consecuencias. Todo depende de la:

- Detectabilidad.
- Tendencia que pueda acusar la anomalía.
- Facilidad de aplicar técnicas predictivas y preventivas.
- Criticidad del activo.

En el diagrama de flujo, se observa que definiendo tres rangos de NPR pueden encauzarse las decisiones sobre los tipos de mantenimiento. Los valores de NPR pueden variar desde 1 (valor mínimo) hasta 1000 (valor máximo). Pueden clasificarse, por ejemplo, los siguientes rangos:

- Poco Importante: NPR < 200
- Normal: 200 a 700
- Crítico: 700 a 1000

No obstante el valor total del NPR para cada modo de fallo, se debe examinar por separado cada uno de los tres factores que lo constituyen: gravedad, frecuencia de fallo y detectabilidad.

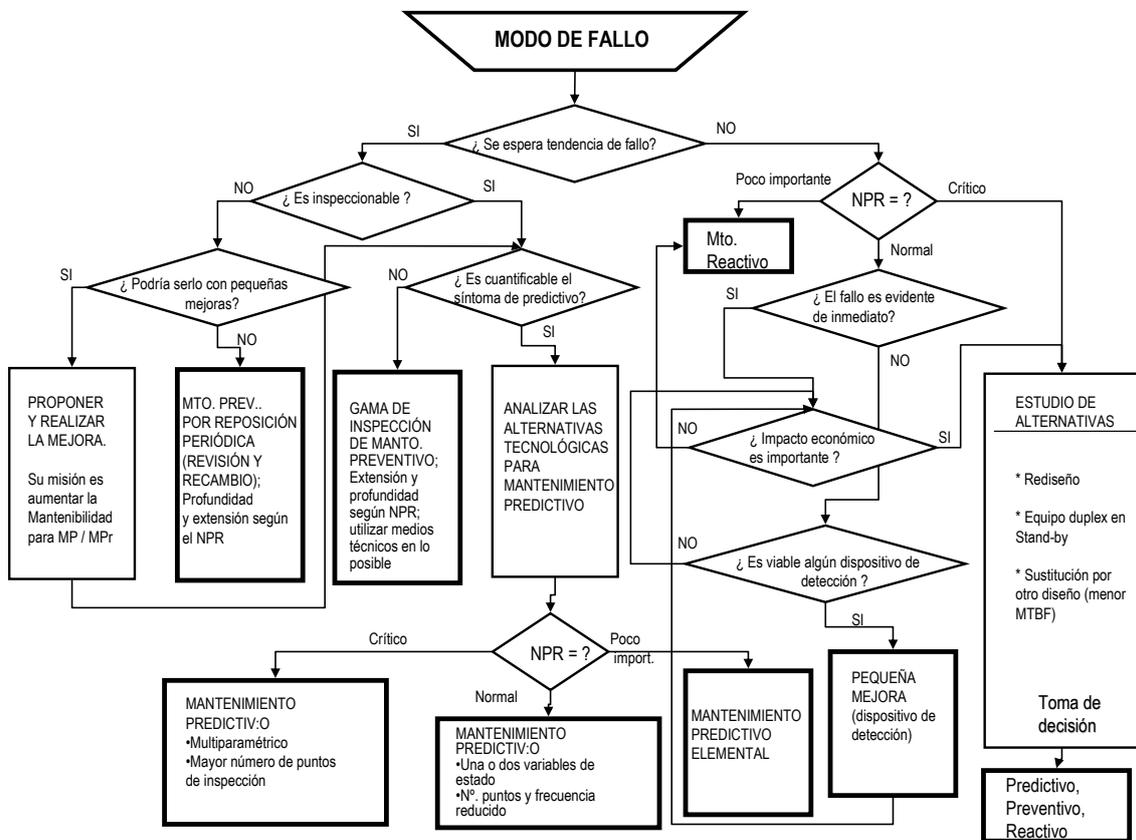


Figura 4.1- Algoritmo RCM

Es necesario conocer métodos e instrumental disponible para el diagnóstico técnico, con el fin de evitar redundancias a la hora de seleccionar actividades preventivas (inspecciones cualitativas) o actividades predictivas (mediciones periódicas de variables de estado técnico con extrapolación de tendencias). Por supuesto, ello implica adquirir el instrumental y formar a los usuarios. Todo solape entre las

inspecciones cualitativas y el predictivo no es rentable. De hecho, los preceptos del RCM rezan que es más racional emplear métodos cuantitativos donde sea posible.

La tabla 4.4 muestra una hoja AMFEC vacía, donde se pueden utilizar para responder a las 7 preguntas básicas del método RCM formuladas en el apartado 4.3. Es la hoja que determina todos los fallos que pueden surgir en el funcionamiento de un activo; así como, su impacto en seguridad y medio ambiente, calidad, producción y mantenimiento. Posibilita asimismo una valoración de cada uno de estos fallos y cuantificarlos con un número que agrupa dicha valoración.

Una vez se ha definido en la hoja AMFEC, todas las posibles formas en las que puede dejar de cumplir las funciones el sistema que se esté estudiando, es necesario definir las acciones que se deben llevar a cabo para prevenir dichas formas de fallar. Para ello se muestra en la tabla 4.5 la hoja Matriz de Decisiones; donde se definirá qué acciones, con qué tecnologías y con qué frecuencias se intervendrá en el sistema para tener la mayor fiabilidad de no aparición de ninguno de los modos de fallos que se han definido en la Hoja AMFEC. Existen tipos de mantenimiento definidos:

- a- **Mantenimiento Predictivo:** Se utiliza ese tipo de mantenimiento, cuando se puede cuantificar numéricamente variables que determinan el funcionamiento de un equipo. Los valores de dichas variables se guardan y se dispone de un registro en el tiempo de la evolución de los valores; así cuando llega a un punto se puede determinar un nivel de alarma, definido como zona peligrosa del valor de la variable y cuando aumenta dicho valor llega a un valor no aceptado o de paro del sistema. La evolución de los valores siguen tendencias con las cuales se puede prever los valores y tomar acciones antes de que surjan las averías destructivas del sistema.
- b- **Mantenimiento por inspección:** Se utiliza ese tipo de mantenimiento, cuando no se puede cuantificar numéricamente ninguna variable, pero se puede inspeccionar el estado cualitativo del elemento o componente del equipo de estudio. Se deberá especificar el tipo de inspección que se requiere y su frecuencia.
- c- **Mantenimiento por reposición o acción periódica:** Se utiliza ese tipo de mantenimiento, cuando no se puede cuantificar numéricamente ninguna variable, ni el elemento o componente son inspeccionables, pero se conoce

con qué frecuencia se debe hacer la actuación sobre el equipo. Se especificará en este caso la operación a hacer y la frecuencia necesaria que se establezca.

- d- **Rediseño o mejora:** Cuando no es aplicables ninguno de los mantenimientos anteriores, esto quiere decir que se debe hacer un rediseño o mejora en el equipo. Esta opción tendrá sentido en el momento que el mantenimiento que se necesite suponga un coste muy alto o una dificultad extrema producto del diseño del propio producto. En este caso, y sólo si hay opción de mejorar rediseñando, se opta por esta opción.

La ponderación que se da al NPR (Número de Ponderación de Riesgo), está formado por el multiplicativo ponderado del 1 al 10 de la gravedad, frecuencia de fallos y detectabilidad. El valor máximo de NPR es 1000 (10 x 10 x 10) y el número mínimo 1 (1 x 1 x 1).

Las tablas 4.6a a 4.6d se puede observar unas hojas de AMFEC de un grupo motor-bomba. A continuación se indican dos ejemplos de dichas tablas.

### **Ejemplo 1**

En la tabla 4.6a, el modo de fallo del nivel C desalineación conjunto; perteneciente al modo de fallo de nivel B rodamiento clavado, perteneciente al modo de fallo de nivel A fallo motor; dispone de un NPR de 140 (5 x 7 x 4):

- Asignado a la gravedad: 5
- Asignado a la frecuencia de fallos: 7
- Asignado a la detectabilidad: 4

Siendo medianamente grave y con una considerable alta frecuencia de fallos, el valor de NPR no llega ni a una quinta parte del valor total, que es 1000.

### **Ejemplo 2**

En la tabla 4.6c, el modo de fallo del nivel C contaminación aceite; perteneciente al modo de fallo de nivel B fallo estanqueidad equipos, perteneciente al modo de fallo de nivel A presión mayor; dispone de un NPR de 180 (9 x 5 x 4):

- Asignado a la gravedad: 9
- Asignado a la frecuencia de fallos: 5
- Asignado a la detectabilidad: 4

Siendo altamente grave y con una media frecuencia de fallos, el valor de NPR no llega ni a una quinta parte del valor total, que es 1000.

Los dos ejemplos muestran unos valores de NPR bajos. Uno de los motivos es que para determinar el valor que se asigna a la frecuencia de fallos, es la misma para todos los tipos de equipos; con lo que con una escala de 1 a 10 se debe cubrir una gran variedad de frecuencias distintas. Una de las mejoras que se aportan al presente estudio, es la definición de varias escalas de frecuencias de fallos, para cada uno de los tipos de equipos que tienen características similares entre ellos.

La hoja se debe cumplimentar entera desde el principio, para cada máquina o instalación, con un elevado tiempo de análisis de técnicos que participan en la configuración de dicha hoja.

Las tablas 4.7a a 4.7d, son las hojas Matriz de Decisiones de las Hojas AMFEC definidas en las tablas 4.6a a 4.6d. Ellas, muestran las diferentes modalidades de mantenimiento, con sus tecnologías y frecuencias de intervención, que hay que aplicar al grupo motor-bomba para prevenir los posibles fallos que puedan surgir.

La nomenclatura de la frecuencia de intervención se define en el capítulo 9 apartado 9.2.2.

Si se observa la tabla 4.7a, dentro del tipo de mantenimiento Predictivo, en el modo de fallo de nivel A fallo bomba; modo de fallo de nivel B rodamientos clavados, aparecen modos de fallos de nivel C:

- Fallo de engrase: Frecuencia de intervención de Análisis Frecuencial 3 meses.
- Desalineación conjunto: Frecuencia de intervención de Análisis Frecuencial 1 mes.

- Mal montaje: Frecuencia de intervención de Análisis Frecuencial 6 meses.

Para prevenir estos tres modos de fallos, se utiliza una técnica de mantenimiento predictivo que es el análisis de espectros de vibración de la bomba; pero, con frecuencias de intervención distintas. Ello es debido a que los valores de NPR son respectivamente, 50, 140 y 50. El caso de los valores de NPR = 50, siendo frecuencias de intervención distintas (3 meses y 6 meses), es a criterio de las personas que diseñan la hoja Matriz de Decisiones y consideran oportuno establecer dichos parámetros. Es obvio, que la frecuencia de intervención de la técnica de Mantenimiento Predictivo análisis de espectros de vibración será la más crítica, en este caso 1 mes, ya que engloba a las demás.



MATRIZ DE DECISIONES	Centro Industrial: Sección/Planta/Código: Instalación/Activo: Criticidad Primer Nivel: Código:			Subsistema: Código: Criticidad Segundo Nivel: Criticidad Tercer Nivel:			Fecha de elaboración: (versión): 1 de HOJA: de			Nº de proyecto - ingeniería: Elaborado por: Revisado por: Autorizado por:						
	EFFECTOS DE FALLO	MODO DE FALLO			MANTENIMIENTO PREDICTIVO			MTO PREV. POR INSPECCIÓN			MTO PREV. POR ACTUACIÓN PLANIFICADA			REDISEÑO / MEJORA		
		A	B	C	OPERACIÓN A REALIZAR	PUNTO DE APLICACIÓN	FREC.	INSPECCIÓN / DETECCIÓN	OPERACIÓN	FREC.	RECAMBIO / MATERIAL	OPERACIÓN	FREC.	DESCRIPCIÓN	REF.	

Tabla 4.5- Hoja Matriz de Decisiones

FUNCIÓN/ PROCESO	PARÁMETRO	FALLOS FUNCIONALES	MODOS DE FALLO			EFECTOS DE FALLO	CONSECUENCIAS DE FALLO						VALORACION DE RIESGO				
			CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C		FALLO OCULTO	SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO	CAIDAD	GRAVEDAD	FREC. FALLOS	DETECTABILIDAD	N.P.R.		
VEHICULAR PRODUCTO	ACEITE TÉRMICO	EL CONJUNTO NO GIRA	FALLO MOTOR	EL MOTOR FUNCIONA SOLO CON DOS FASES	FALLO DE VANADO DEL MOTOR	SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	NO	NO	SI	SI	NO	5	3	2	30		
					FALLO CONEXIONES EN EL MOTOR	SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	NO	NO	SI	SI	NO	5	3	2	30		
					FALLO DE ALIMENTACIÓN	SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	NO	NO	SI	SI	NO	5	3	2	30		
				FALLO MOTOR	FALLO VENTILACIÓN	OBTURACIÓN REJILLA FILTRO	CALENTAMIENTO DEL MOTOR Y SE QUEMA EL DEVANADO	SI	NO	SI	SI	NO	5	3	1	15	
						ROTURA DEL VENTILADOR	CALENTAMIENTO DEL MOTOR Y SE QUEMA EL DEVANADO	SI	NO	SI	SI	NO	5	2	2	20	
						ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	3	4	60	
						FALLO DE ENGRASE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	4	4	80	
				FALLO ACOPLAMIENTO	RODAMIENTOS CLAVADOS	DESALINEACIÓN CONJUNTO	DESALINEACIÓN CONJUNTO	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	7	4	140
							MAL MONTAJE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	2	4	40
							ROTURA CHAVETEROS	PARO BOMBA	SI	NO	SI	SI	NO	5	3	2	30
				FALLO BOMBA	RODAMIENTOS CLAVADOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	FALLO FIJACIÓN	PARO BOMBA	SI	NO	SI	SI	NO	5	4	2	40
							FALLO ELEMENTO ELÁSTICO	PARO BOMBA	SI	NO	SI	SI	NO	5	4	2	40
							FALLO DE ENGRASE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	5	2	50
							DESALINEACIÓN CONJUNTO	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	5	2	50
							MAL MONTAJE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	7	4	140
							INSERCIÓN DE PARTÍCULAS EN LA HOLLGURA RODETE-CARCASA	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	2	4	40
FALLO BOMBA	CLAVADA DE RODETE	ROTURA DE ANILLOS DE SEGURIDAD	DESEQUILIBRADO RODETE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	4	5	100				
			ROTURA DE ANILLOS DE SEGURIDAD	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	5	4	100				

Tabla 4.6a- AMFEC de un grupo motor-bomba

FUNCIÓN / PROCESO	PARÁMETRO	FALLOS FUNCIONALES	MODOS DE FALLO			EFECTOS DE FALLO	CONSECUENCIAS DE FALLO						VALORACIÓN DE RIESGO									
			CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C		FALLO OCULTO	SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO	CALIDAD	GRAVEDAD	FREC. FALLOS	DETECTABILIDAD	N.P.R.							
VEHICULAR PRODUCTO	ACEITE TÉRMICO	EL CONJUNTO GIRA	FALLO MOTOR	FALLO RODAMIENTOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	3	5	2	30					
					FALLO DE ENGRASE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	5	3	45		
					DESALINEACIÓN CONJUNTO	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	3	7	5	105	
				MAL MONTAJE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	3	2	5	30		
				SOBRECARGA	VELOCIDAD MENOR	CALENTAMIENTO DEL MOTOR	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	2	6	5	60		
				BAJA TENSIÓN	FALLO DEVANADO	NO SE CUMPLEN CONDICIONES DE SERVICIO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	1	4	5	20		
			FALLO BOMBA	LA BOMBA GIRA EN SENTIDO CONTRARIO	FALLO RODAMIENTOS	PAR MOTOR MENOR	NO SE CUMPLEN CONDICIONES DE SERVICIO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	3	5	45		
						ROTURA PARCIAL ELEMENTO ELÁSTICO	FALLO ELEMENTO ELÁSTICO	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	2	5	2	20	
						ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	FALLO ELEMENTO ELÁSTICO	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	5	2	30
						FALLO DE ENGRASE	FALLO RODAMIENTOS	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	5	3	45
						DESALINEACIÓN CONJUNTO	FALLO EJE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	7	5	105
						MAL MONTAJE	FALLO RODETE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	2	5	30
FALLO BOMBA	LA BOMBA GIRA EN SENTIDO CONTRARIO	FALLO RODETE	EJE RAYADO	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	5	3	45					
			ABRASIÓN ÁLAVES	FALLO RODETE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	4	5	60				
			DESEQUILIBRADO RODETE	FALLO RODETE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	4	5	60				
			CAMBIO SECUENCIA DE FASES MOTOR	LA BOMBA GIRA EN SENTIDO CONTRARIO	MEJOR CAUDAL / MENOR PRESIÓN	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	1	2	2	4			
FALLO BOMBA	ESFUERZOS EXCESIVOS	FALLO RODETE	LA BOMBA ESTÁ FORZADA	FATIGA RODAMIENTOS	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	6	6	108					
			EMPUJE AXIAL LEVADO	FATIGA RODAMIENTOS	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	6	6	108				
			LOS TORNILLOS NO ESTÁN BIEN APRETADOS	FATIGA RODAMIENTOS	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	1	6	2	12				

Tabla 4.6b- AMFEC de un grupo motor-bomba

FUNCIÓN / PROCESO	PARÁMETRO	FALLOS FUNCIONALES	MODOS DE FALLO			EFECTOS DE FALLO	CONSECUENCIAS DE FALLO						VALORACIÓN DE RIESGO			
			CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C		FALLO OCULTO	SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO	CALIDAD	GRAVEDAD	FREC. FALLOS	DETECTABILIDAD	N.P.R.	
MANTENER PRESIÓN DE TRABAJO	6,1-8,9 kg/cm <sup>2</sup>	PRESIÓN MAYOR	MANIPULACIÓN ERRÓNEA DE VÁLVULAS			CIRCULACIÓN ACEITE A TANQUE NODRIZA / POSIBLE VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEA	NO	NO	NO	SI	NO	2	4	2	16	
			AUMENTO DE LA PRESIÓN DE SELLADO	FALLO VÁLVULA DE ALIVIO		DISPARO VÁLVULAS SEGURIDAD	SI	NO	NO	SI	NO	2	4	2	16	
			FALLO CONTROL DE TEMPERATURA CALDERA	AUTOREGULADOR DE NITRÓGENO		DISPARO VÁLVULAS SEGURIDAD	SI	NO	NO	NO	SI	NO	2	6	2	24
			FALLO ESTANQUEIDAD EQUIPOS	AUMENTO DE TEMPERATURA ACEITE		CIRCULACIÓN ACEITE A TANQUE NODRIZA / POSIBLE VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEA	NO	NO	NO	SI	NO	3	4	2	24	
			FALLO INSTALACIÓN	CONTAMINACIÓN ACEITE	CONTAMINACIÓN AGUA POR E-204	DISPARO VÁLVULA SEGURIDAD EXPANSIONADOR	SI	SI	SI	SI	SI	9	5	4	180	
			FALLO ACEITE	OBSTRUCCIÓN PARCIAL CIRCUITO	CONTAMINACIÓN PRODUCTO	CIRCULACIÓN ACEITE A TANQUE NODRIZA / POSIBLE VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEA	SI	SI	SI	SI	SI	7	1	4	28	
			FALLO BOMBA	ACEITE TÉRMICO FUERA DE CONDICIONES DE SERVICIO		CIRCULACIÓN ACEITE A TANQUE NODRIZA / POSIBLE VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEA	SI	NO	SI	SI	NO	3	3	2	18	
			FALLO BOMBA	DEGRADACIÓN FLUIDO TÉRMICO		DENSIDAD O VISCOSIDAD DEL FLUIDO DIFIERE DE LAS CONDICIONES DE SERVICIO	NO	NO	NO	NO	NO	1	6	2	12	
			FALLO BOMBA	OBSTRUCCIÓN EN LA IMPULSIÓN		PÉRDIDA DE RENDIMIENTO DE CALEFACCIÓN	SI	SI	SI	SI	NO	7	3	5	105	
			FALLO BOMBA	DESGASTE RODETE		AUMENTO DE PRESIÓN	SI	NO	NO	SI	NO	3	3	2	18	
PRESIÓN MENOR			BOLSAS DE GAS EN TUBERÍA		ABRASIÓN	SI	NO	NO	SI	NO	3	3	3	27		
			OBSTRUCCIÓN EN LA ASPIRACIÓN		CORROSIÓN	SI	NO	NO	SI	NO	3	3	3	27		
			FALLO MOTOR	VELOCIDAD MENOR	NPSH DE LA INSTALACIÓN MUY BAJO	SI	NO	NO	SI	NO	3	3	3	27		
			MENOR PÉRDIDA DE CERRADAS FUGAN INTERNAMENTE	VÁLVULAS	FILTRO DE ASPIRACIÓN OBSTRUIDO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	2	6	2	24	
					SOBRECARGA	SI	NO	NO	NO	NO	2	6	2	24		
					BAJA TENSION	SI	NO	NO	NO	NO	2	6	2	24		
						CAVITACIÓN, RUIDO, VIBRACIONES	SI	NO	NO	SI	NO	2	6	2	24	
						CALENTAMIENTO DEL MOTOR NO SE CUMPLEN CONDICIONES DE SERVICIO	SI	NO	NO	SI	NO	3	6	3	54	
			MAYOR CONSUMO / SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA	SI	NO	NO	NO	SI	1	1	3	3				
				SI	NO	NO	SI	NO	4	4	4	64				

Tabla 4.6c- AMFEC de un grupo motor-bomba

FUNCIÓN/ PROCESO	PÁRAMETRO	FALLOS FUNCIONALES	MODOS DE FALLO				EFECTOS DE FALLO	CONSECUENCIAS DE FALLO						VALORACIÓN DE RIESGO		
			CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C			FALLO OCULTO	SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO	CALIDAD	GRAVEDAD	FREC. FALLOS	DETECTABILIDAD	N.P.R.
MANTENER CAUDAL DE TRABAJO	65-105 m <sup>3</sup> /h	CAUDAL MENOR	FALLO BOMBA	DESgaste RODETE	ABRASIÓN	MENOR PRESIÓN	SI	NO	SI	NO	3	3	3	27		
					Cavitación	MENOR PRESIÓN	SI	NO	SI	NO	3	3	3	27		
					CORROSIÓN	MENOR PRESIÓN	SI	NO	SI	NO	3	3	3	27		
					BOLSAS DE GAS EN TUBERÍA	NPSH DE LA INSTALACIÓN MUY BAJO	SI	NO	SI	NO	2	6	2	2	24	
MANTENER CAUDAL DE TRABAJO	65-105 m <sup>3</sup> /h	CAUDAL MENOR	OBSTRUCCIÓN EN LA IMPULSIÓN		AUMENTO DE PRESIÓN	SI	NO	SI	NO	3	3	2	18			
			OBSTRUCCIÓN EN LA ASPIRACIÓN	FILTRO DE ASPIRACIÓN OBSTRUÍDO	CAVITACIÓN, RUIDO, VIBRACIONES	SI	NO	SI	NO	2	6	2	24			
			ACEITE TÉRMICO FUERA DE CONDICIONES DE SERVICIO		DENSIDAD O VISCOSIDAD DEL FLUIDO DIFIERE DE LAS CONDICIONES DE SERVICIO	NO	NO	NO	NO	1	6	2	12			
			DEGRADACIÓN FLUIDO TÉRMICO		CONTAMINACIÓN	SI	SI	SI	NO	7	3	5	105			
MANTENER CAUDAL DE TRABAJO	65-105 m <sup>3</sup> /h	CAUDAL MAYOR	VALVULAS CERRADAS FUGAN INTERNAMENTE		MAYOR CONSUMO / SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA	SI	NO	SI	NO	4	4	4	64			
			ROTURA DE CUERPO BOMBA		FUGAS DE ACEITE	NO	SI	SI	NO	9	2	1	18			
			ESTANQUEIDAD ESTOPADA Y CIERRE	DESGASTE CARAS DE ROCE ENVEJECIMIENTO MAL MONTAJE	FUGAS DE ACEITE	NO	NO	SI	NO	6	6	2	72			
				ENVEJECIMIENTO	FUGAS DE ACEITE	NO	NO	SI	NO	6	4	2	48			
MANTENER CAUDAL DE TRABAJO	65-105 m <sup>3</sup> /h	CAUDAL MAYOR	ESTANQUEIDAD JUNTAS CUERPO Y/O PALIER BOMBA	DESAPRIETE TORNILLOS MAL MONTAJE	FUGAS DE ACEITE	NO	SI	NO	SI	NO	6	4	2	48		
				JUNTA INADECUADA	FUGAS DE ACEITE	NO	SI	NO	SI	NO	6	4	2	48		
				FALLO TAPONES DE DESAIREACIÓN O LLENADO	FUGAS DE ACEITE	NO	NO	SI	NO	4	4	2	32			
				TAPÓN DE VACIADO	FUGAS DE ACEITE	NO	NO	SI	NO	6	1	1	6			
MANTENER CAUDAL DE TRABAJO	65-105 m <sup>3</sup> /h	CAUDAL MAYOR	FALLO JUNTA		FUGAS DE ACEITE	NO	NO	SI	NO	6	4	2	48			
			DESAPRIETE TORNILLOS		FUGAS DE ACEITE	NO	NO	SI	NO	6	6	2	72			
			MAL MONTAJE	DESALINEACIÓN	FUGAS DE ACEITE	NO	NO	SI	NO	6	3	2	36			
				NO HAY JUNTA	FUGAS DE ACEITE	NO	NO	SI	NO	8	3	2	48			

Tabla 4.6d- AMFEC de un grupo motor-bomba

EFECTOS DE FALLO	N <sup>o</sup>	MODO DE FALLO			MANTENIMIENTO PREDICTIVO			MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR INSPECCIÓN		MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR RECAMBIO / MATERIAL		REDISEÑO / MEJORA
		A	B	C	OPERACIÓN A REALIZAR	PUNTO DE APLICACIÓN	FREC.	INSPECCIÓN / DETECCIÓN	OPERACIÓN	FREC.	DESCRIPCIÓN	
SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	30		EL MOTOR FUNCIONA SÓLO CON DOS FASES	FALLO DEVANADO DEL MOTOR	MEDICIÓN DE AISLAMIENTO DEVANADO		1A					
SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	30			FALLO CONEXIONES EN EL MOTOR					INSPECCIÓN VISUAL ABRIENDO LA CAJA	3A		
SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	30			FALLO DE ALIMENTACIÓN					INSPECCIÓN DEL CUBICULO ARRANCADOR Y COMPRAR LIMPIEZA	1A		
CALENTAMIENTO DEL MOTOR Y SE QUEMA EL DEVANADO	15		FALLO VENTILACIÓN	OBTURACIÓN REJILLA FILTRO					INSPECCIÓN VISUAL/ESTROBOSCOPIA	1A		
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	60			ROTURA DEL VENTILADOR	ANÁLISIS FRECUENCIAL		1A					
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	80		RODAMIENTOS CLAVADOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	ANÁLISIS FRECUENCIAL		1A					
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	140			FALLO DE ENGRASE	ANÁLISIS FRECUENCIAL		1A					ENGRASE Y LUBCHECKER 1A
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	40			DESALINEACIÓN CONJUNTO	ANÁLISIS FRECUENCIAL		1A					
PARO BOMBA	30		ROTURA CHAVETEROS	MAL MONTAJE	ANÁLISIS FRECUENCIAL		1A					
PARO BOMBA	40	FALLO ACOPLAMIENTO O	FALLO FIJACIÓN	DESAPRIETE TORNILLOS					INSPECCIÓN ESTROBOSCÓPICA	1A		
PARO BOMBA	40		FALLO ELEMENTO ELÁSTICO	ROTURA TOTAL ELEMENTO ELÁSTICO					INSPECCIÓN VISUAL	1A		
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	50			ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD					INSPECCIÓN DE TAPONES	6M		
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	50		RODAMIENTOS CLAVADOS	FALLO DE ENGRASE	ANÁLISIS FRECUENCIAL		3M					CAMBIAR ACEITE 3M
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	140			DESALINEACIÓN CONJUNTO	ANÁLISIS FRECUENCIAL		1M					
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	50	FALLO BOMBA		MAL MONTAJE	ANÁLISIS FRECUENCIAL		6M					
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	40		CLAVADA DE RODETE	INSERCIÓN DE PARTÍCULAS EN LA HOLGURA RODETE-CARCAZA								REVISAR Y LIMPIAR FILTRO 6M
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	100			DESEQUILIBRADO RODETE								EQUILIBRADO DEL RODETE 1A
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	100			ROTURA DE ANILLOS DE SEGURIDAD								CAMBIO ANILLOS EN 1A

Tabla 4.7a- Matriz de Decisiones de un grupo motor-bomba

EFECTOS DE FALLO	C	MODO DE FALLO	MANTENIMIENTO PREDICTIVO		MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR		MANTENIMIENTO		REDISEÑO / MEJORA
			OPERACIÓN A REALIZAR	PUNTO DE APLICACIÓN	FREC.	INSPECCIÓN / DETECCIÓN OPERACIÓN	RECAMBIO / MATERIAL OPERACIÓN	FREC. DESCRIPCIÓN	
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	30	A	B	C	ANÁLISIS FRECUENCIAL	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	1A		
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	45		FALLO RODAMIENTOS	FALLO DE ENGRASE	ANÁLISIS FRECUENCIAL		1A	ENGRASE Y LUBRICADOR	1A
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	105		FALLO MOTOR	DESALINEACIÓN CONJUNTO	ANÁLISIS FRECUENCIAL		1A		
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	30			MAL MONTAJE	ANÁLISIS FRECUENCIAL		1A		
CALENTAMIENTO DEL MOTOR	60			SOBRECARGA					
NO SE CUMPLEN CONDICIONES DE SERVICIO	20			BAJA TENSIÓN					
NO SE CUMPLEN CONDICIONES DE SERVICIO	45			PAR MOTOR MENOR	MEDICIÓN CONSUMO		1A		
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	20	FALLO ACOPLAMIENTO	FALLO ELEMENTO ELÁSTICO	ROTURA PARCIAL ELEMENTO ELÁSTICO				INSPECCIÓN ESTROBOSCÓPICA	1A
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	30			ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD				INSPECCIÓN DE TAPONES	6M
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	45		FALLO RODAMIENTOS	FALLO DE ENGRASE	ANÁLISIS FRECUENCIAL		3M	CAMBIAR ACEITE	3M
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	105			DESALINEACIÓN CONJUNTO	ANÁLISIS FRECUENCIAL		1M		
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	30			MAL MONTAJE	ANÁLISIS FRECUENCIAL		6M		
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	45		FALLO EJE	EJE RAYADO				VERIFICAR ESTADO DE EJE	1A
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	60		FALLO RODETE	ABRASIÓN ÁLVES				VERIFICAR ESTADO RODETE	1A
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	60	FALLO BOMBA		DESEQUILIBRADO RODETE				VERIFICAR ESTADO RODETE	1A
MENOR CAUDAL / MENOR PRESIÓN	4			CAMBIO SECUENCIA DE FASES MOTOR					
FATIGA RODAMIENTOS	108			LA BOMBA ESTÁ FORZADA	MEDICIÓN CONSUMO		1A		
FATIGA RODAMIENTOS	108		ESFUERZOS EXCESIVOS	EMPUJE AXIAL ELEVADO LOS TORNILLOS NO ESTÁN BIEN APRETADOS	MEDICIÓN TEMPERATURA DE RODAMIENTOS		1A		
FATIGA RODAMIENTOS	12				ANÁLISIS FRECUENCIAL		1M		

Tabla 4.7b- Matriz de Decisiones de un grupo motor-bomba

EFECTOS DE FALLO	N.P.R.	MODO DE FALLO			C	MANTENIMIENTO PREDICTIVO			MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR INSPECCIÓN		MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR RECAMBIO / MATERIAL	REDESÑO / MEJORA
		A	B			OPERACIÓN A REALIZAR	PUNTO DE APLICACIÓN	FREC.	INSPECCIÓN / DETECCIÓN	FREC.		
									OPERACIÓN	OPERACIÓN		
CIRCULACIÓN ACEITE A TANQUE NODRIZA / POSIBLE VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEA	16	MANIPULACIÓN ERRÓNEA DE VÁLVULAS				COMPROBAR PRESIÓN MANÓMETRO		2H				
DISPARO VÁLVULAS SEGURIDAD	16	AUMENTO DE LA PRESIÓN DE SELLADO	FALLO VÁLVULA DE ALIVIO						6M			
DISPARO VÁLVULAS SEGURIDAD	24		FALLO DEL AUTOREGULADOR DE NITRÓGENO						6M			
CIRCULACIÓN ACEITE A TANQUE NODRIZA / POSIBLE VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEA	24	FALLO CONTROL DE TEMPERATURA A CALDERA	AUMENTO DE TEMPERATURA A ACEITE			COMPROBAR TEMPERATURA		2H				
DISPARO VÁLVULA SEGURIDAD	180	FALLO EXPANSIONADOR	CONTAMINACIÓN A ACEITE			ANÁLISIS DE ACEITE		1A				
CIRCULACIÓN ACEITE A TANQUE NODRIZA / POSIBLE VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEA	28	FALLO ESTANQUEIDAD DE EQUIPOS	CONTAMINACIÓN A ACEITE			ANÁLISIS DE ACEITE		1A				
CIRCULACIÓN ACEITE A TANQUE NODRIZA / POSIBLE VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEA	18	FALLO INSTALACIÓN	OBSTRUCCIÓN PARCIAL CIRCUITO ACEITE			COMPROBAR PRESIÓN MANÓMETRO		2H				
DENSIDAD O VISCOSIDAD DEL FLUIDO DIFIERE DE LAS CONDICIONES DE SERVICIO	12	FALLO ACEITE	TÉRMINO FUERA DE CONDICIONES DE SERVICIO									
PÉRDIDA DE RENDIMIENTO DE CALEFACCIÓN	105		DEGRADACIÓN FLUIDO TÉRMICO			ANÁLISIS DE ACEITE		1A				
AUMENTO DE PRESIÓN	18	FALLO BOMBA	OBSTRUCCIÓN EN LA IMPULSIÓN			COMPROBAR PRESIÓN MANÓMETRO		2H				
MENOR PRESIÓN	27		DESGASTE RODETE									
MENOR PRESIÓN	27											
MENOR PRESIÓN	27											
MENOR PRESIÓN	24	FALLO BOMBA	BOLSAS DE GAS EN TUBERÍA									
CAVITACIÓN, RUIDO, VIBRACIONES	24		OBSTRUCCIÓN EN LA ASPIRACIÓN									
CALENTAMIENTO DEL MOTOR	54		VELOCIDAD MENOR									
NO SE CUMPLEN CONDICIONES DE SERVICIO	3											
MAYOR CONSUMO / SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA	64	MENOR PÉRDIDA DE CARGA IMPULSIÓN	VÁLVULAS CERRADAS FUGAN INTERNAMENTE			VERIFICACIÓN CONSUMO ELÉCTRICO		CUANDO OCURRA				

Tabla 4.7c- Matriz de Decisiones de un grupo motor-bomba

EFECTOS DE FALLO	N.º	MODO DE FALLO			MANTENIMIENTO PREDICTIVO		MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR		MANTENIMIENTO		REDISEÑO / MEJORA		
		A	B	C	OPERACIÓN A REALIZAR	PUNTO DE APLICACIÓN	FREC.	INSPECCIÓN / DETECCIÓN	OPERACIÓN	FREC.		RECAMBIO / MATERIAL	FREC.
MENOR PRESIÓN	27			CAVITACIÓN	COMPROBAR PRESIÓN MANÓMETRO		2H						
MENOR PRESIÓN	27			CORROSIÓN	COMPROBAR PRESIÓN MANÓMETRO		2H	VERIFICAR ESTADO RODETE		1A			
MENOR PRESIÓN	24		BOLSAS DE GAS EN TUBERÍA	NPSH DE LA INSTALACIÓN MUY BAJO	COMPROBAR PRESIÓN MANÓMETRO		2H						
AUMENTO DE PRESIÓN	18		OBSTRUCCIÓN EN LA IMPULSIÓN		COMPROBAR PRESIÓN MANÓMETRO		2H				REVISAR Y LIMPIAR FILTRO	6M	
CAVITACIÓN, RUIDO, VIBRACIONES	24		OBSTRUCCIÓN EN LA ASPIRACIÓN	FILTRO DE ASPIRACIÓN OBSTRUIDO	COMPROBAR PRESIÓN MANÓMETRO		2H				REVISAR Y LIMPIAR FILTRO	6M	
DENSIDAD O VISCOSIDAD DEL FLUIDO DIFIERE DE LAS CONDICIONES DE SERVICIO	12		ACEITE TÉRMICO FUERA DE CONDICIONES DE SERVICIO										
CONTAMINACIÓN	105		FALLO ACEITE	DEGRADACIÓN FLUIDO TÉRMICO	ANÁLISIS DE ACEITE		1A						
MAYOR CONSUMO / SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA	64		VALVULAS CERRADAS FUGAN INTERNAMENTE		VERIFICACIÓN CONSUMO ELÉCTRICO								
FUGAS DE ACEITE	18		ROTURA DE CUERPO BOMBA								PRUEBAS DE APARATOS A PRESIÓN	10A	
FUGAS DE ACEITE	72		ESTANQUEIDAD ESTOPADA Y CIERRE	DESGASTE CARAS DE ROCE				VERIFICAR CHIVATO DE FUGAS		2H			
FUGAS DE ACEITE	48			ENVEJECIMIENTO MAL MONTAJE				VERIFICAR CHIVATO DE FUGAS		2H			
FUGAS DE ACEITE	48			ENVEJECIMIENTO				VERIFICAR FUGAS		2H			
FUGAS DE ACEITE	48		ESTANQUEIDAD JUNTAS CUERPO Y/O PALIER BOMBA	DESAPRIETE TORNILLOS MAL MONTAJE				VERIFICAR FUGAS		2H			
FUGAS DE ACEITE	48			JUNTA INADECUADA				VERIFICAR FUGAS		2H			
FUGAS DE ACEITE	32		FALLO TAPONES DE DESAIREACIÓN O LLENADO					VERIFICAR FUGAS		PUE S DE INTE RUE			
FUGAS DE ACEITE	6		TAPON DE VACIADO					VERIFICAR FUGAS		2H			
FUGAS DE ACEITE	48		FALLO JUNTA					VERIFICAR FUGAS		2H			
FUGAS DE ACEITE	72		FALLO DESAPRIETE TORNILLOS					REAPRIETE		DES RUE			
FUGAS DE ACEITE	36		FALLO EMBRIDADO ASPIRACIÓN Y/O IMPULSIÓN	DESALINEACIÓN				VERIFICAR ALINEACIÓN		DES RUE			
FUGAS DE ACEITE	48			NO HAY JUNTA				VERIFICAR QUE HAYA JUNTA		DES RUE			

Tabla 4.7d- Matriz de Decisiones de un grupo motor-bomba

## 4.4 METODOLOGÍAS

Este apartado indica la metodología diseñada para la implantación de Mantenimiento Preventivo y Predictivo en centros industriales o productivos. Para poder diseñar dicha metodología, mostrada en la figura 4.4, ésta se ayuda de otras metodologías ya implantadas como son la Estrategia de SAMI (Strategic Asset Management Inc.), mostrada en la figura 4.2, la cual indica la pirámide de métodos, tecnologías y sistemas necesarios de forma ordenada, para conseguir la adecuada gestión de activos en plantas industriales.

La figura 4.3, muestra el modelo BMM (Business Maintenance Model) de Asset Management de PMM Institute For Learning, donde se muestran las diferentes fases necesarias para la implantación de un sistema de gestión de activos, empezando por cuestionario de diagnóstico, siguiendo por implantación de métodos y tecnologías, KPI's (Key Performance Indicators (Indicadores de gestión)), para acabar implementando la estrategia.

La metodología planteada en la presente tesis doctoral, basa su implantación en 4 fases, que son:

- 1- Detección de incidencias y necesidades.
- 2- Planificación y ejecución de trabajos de Mantenimiento.
- 3- Medida de resultados de los trabajos con KPI's.
- 4- Toma de decisiones.

La metodología, se delimita en una revisión cíclica de las variables utilizadas en la metodología, hasta encontrar el óptimo; y también se delimita en la viabilidad económica. Las casillas de plan proyecto, manual de mantenimiento, informes mensuales, gestión almacenes de mantenimiento, formación; son piezas auxiliares de la metodología que hay que tener en cuenta, ya que ayudan a su implantación.

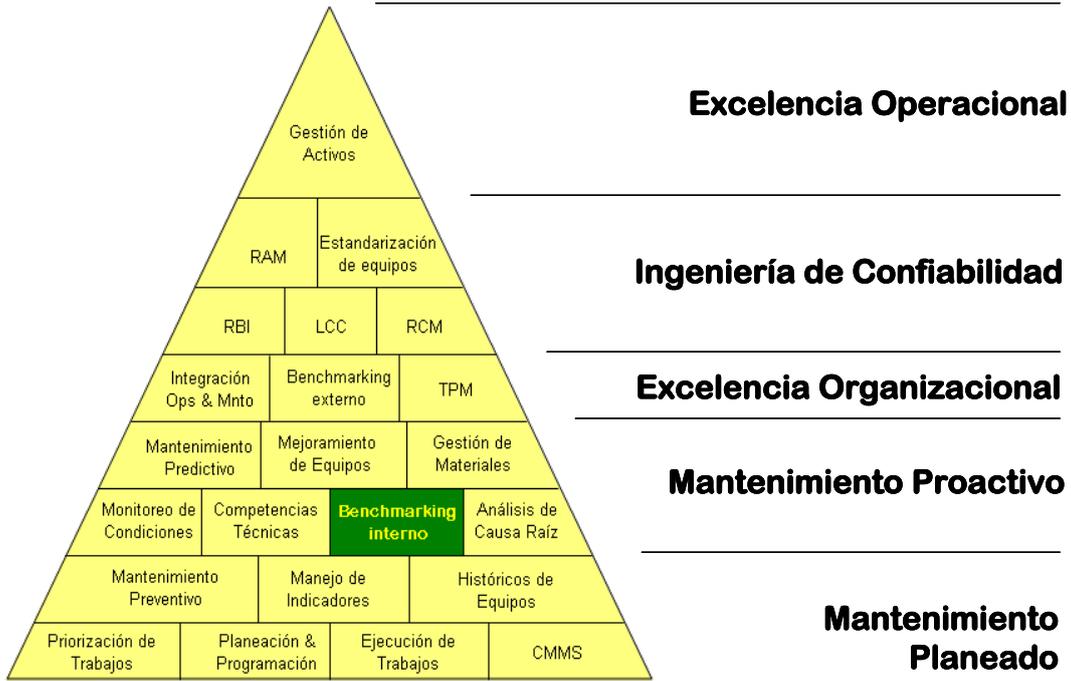


Figura 4.2- Estrategia de SAMI (Strategic Asset Management Inc.)

### BMM ( Business Maintenance Model ) Asset Management

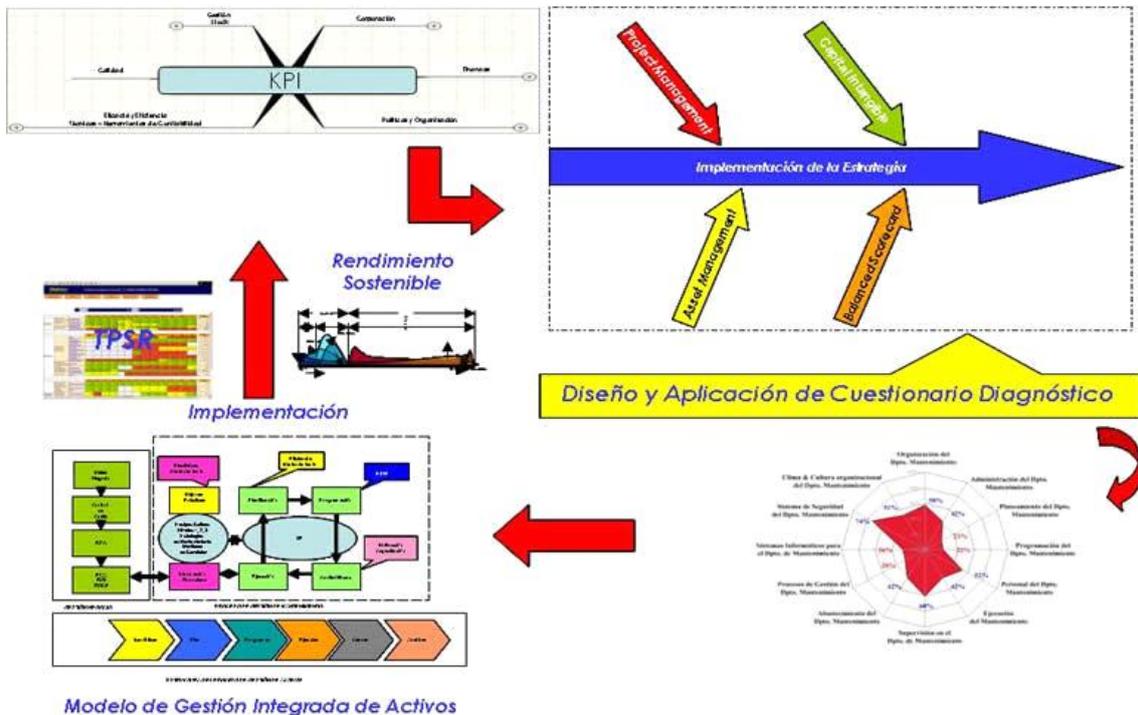


Figura 4.3- Modelo BMM (Business Maintenance Model) de Asset Management de PMM Institute For Learning

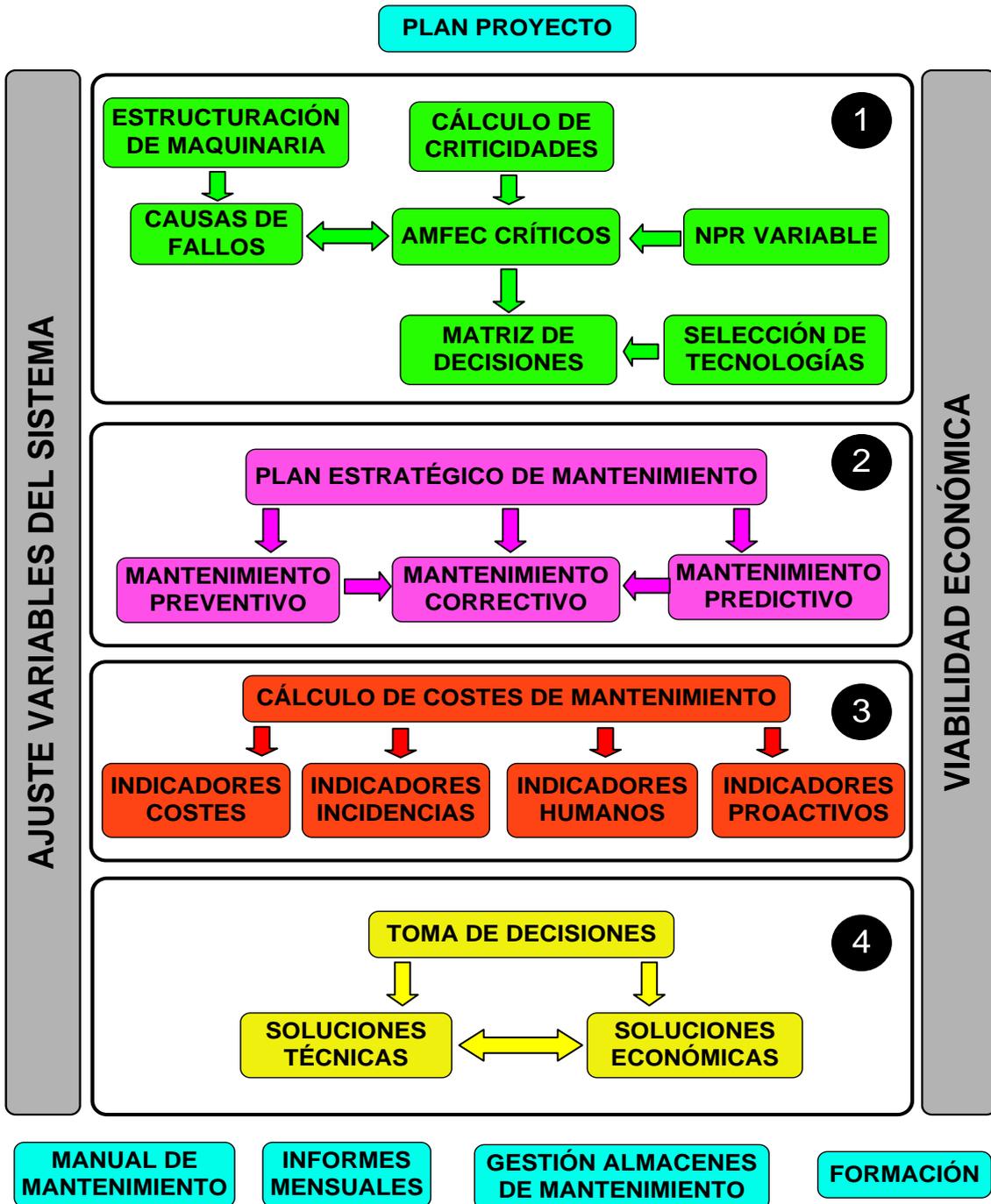


Figura 4.4- Esquema de implantación de Mantenimiento Preventivo y Predictivo

## 4.5 RESULTADOS

Dado que el presente capítulo se basa en la definición de un método, no se puede decir nada relevante acerca de los resultados obtenidos; pero, si que se puede destacar los resultados obtenidos en los ejemplos de implantación de RCM de un

grupo motor bomba. Las hojas AMFEC y matriz de decisiones, son una base para poder plasmar las 7 preguntas del método RCM tal y como define Moubray en su obra. En ellas, se observa en las tablas 4.6a, 4.6b, 4.6c, 4.6d, 4.7a, 4.7b, 4.7c y 4.7d el desglose de tres niveles de modos de fallos para poder definir efectos y consecuencias de los fallos; así como, la valoración del riesgo que ocasionan. Pero, solo existen 4 funciones básicas del grupo motor-bomba y 7 fallos funcionales.

Funciones básicas:

- Vehicular producto
- Mantener presión de trabajo
- Mantener caudal de trabajo
- Contener aceite

Fallos funcionales:

- El conjunto no gira
- El conjunto gira
- Presión mayor
- Presión menor
- Caudal menor
- Caudal mayor
- Fugas al exterior

Hay que indicar que aunque no parezca un fallo funcional el conjunto gira, se ha definido como tal para definir un estado del grupo motor-bomba donde aparecen modos de fallos, aunque la bomba y motor giren; de aquí, se extrae que un equipo rotativo aunque esté girando no quiere decir que funcione correctamente.

Las metodologías muestran modelos diferentes para conseguir objetivos comunes al método RCM y gestionar correctamente los activos bajo estudio.

## 4.6 CONCLUSIONES

La conclusión principal que se extrae es que el método RCM, es una herramienta muy útil para determinar los posibles fallos que pueden aparecer en activos y sistemas, es muy metódica y que hay que seguir paso a paso, según marcan las 7 preguntas para la implantación de RCM.

En el caso de estudio mostrado, tanto hojas AMFEC como matriz de decisiones, se observa cómo se puede detallar hasta donde se quiera el nivel del fallo a estudiar. A cada fallo se determinan sus efectos, consecuencias y se valora el riesgo de cada fallo en gravedad, frecuencia de aparición y detectabilidad. Esta información es la idónea para asignar recursos de Mantenimiento Preventivo y Predictivo al activo de estudio. En el caso de de estudio, se determinan recursos para solventar cada uno de los fallos; pero, también se pueden asignar recursos de forma general al activo para prevenir los fallos, esta forma reduce el tiempo de análisis de la matriz de decisiones, pero no es tan fiable, ya que el detalle que se ha logrado en el cálculo del NPR por fallo, pierde un poco de valor al tomar una decisión global.

Las diferentes metodologías mostradas indican que es posible diseñar maneras diferentes de gestionar los activos, todo depende de la habilidad de los diseñadores de métodos en crearlos.



## 5

# DESARROLLO DE LA MEJORA DEL MÉTODO RCM

## 5.1 OBJETIVOS

El objetivo es definir unas etapas para hacer aportaciones al método RCM y diseñar un método para implantar RCM, con las mejoras que se irán desarrollando capítulo a capítulo en la presente tesis doctoral.

No se aportan mejoras en todos los pasos de implantación de RCM, solo los pasos que se indican son los que se aportan cambios o complementos, para que sin perder el rigor de la metodología RCM, sea más fácil y en algunos casos nivel de desarrollo.

## 5.2 DESARROLLO

El protocolo de la Mejora de la Metodología RCM a partir del AMFEC e implantación de Mantenimiento Preventivo y Predictivo en plantas de procesos, descrito para plantear una correcta estrategia de mantenimiento, se puede visualizar en la figura 5.1, donde se observan las diferentes etapas que se debe seguir para tipificar las incidencias que aparecen en la operativa diaria de una empresa industrial y como

solucionarlas con el menor número de recursos consumidos; tareas que realiza el equipo de trabajo de mantenimiento de dicha empresa.

Las etapas a seguir son las siguientes:

- 1- Definir el **tipo de industria** donde está colocada el centro industrial o productivo de estudio (química, petroquímica, nuclear, farmacéutica, alimentaria, automoción, logística, servicios, agricultura, etc.)
- 2- **Tipo de maquinaria** que se utiliza en el centro industrial o productivo de estudio (líneas de montaje, máquinas rotativas, maquinaria del sector energético (intercambiadores de calor, tuberías, depósitos, bombas,...), robótica, maquinaria de obra civil, instrumentación, aparatos de calibración, transporte, computación,...).
- 3- **Número de equipos** que se dispone.
- 4- **Estructuración de los equipos** por familias, con características de frecuencia de fallos y detectabilidad parecidos.
- 5- **Estudio de la criticidad** de los equipos y ponderarlos según uno de los métodos mencionados anteriormente.
- 6- Definir los **tipos de fallos tipo y su frecuencia**, para poder parametrizar que incidencias se pueden encontrar en el tipo de industria donde se realiza el estudio.
- 7- **Plan Estratégico de Mantenimiento** para generación de rutas preventivas y predictivas por plantas y por frecuencias de actuación.
- 8- Diseñar la estructura de **indicadores de gestión** y recogida de datos que den valor añadido a la gestión de las actuaciones de Mantenimiento.
- 9- **Toma de decisiones** para retocar la planificación y estrategia de mantenimiento con el fin de optimizar los costes asignados al departamento.

Se puede observar en figura 5.1, como de la etapa 9 emana 4 salidas en función de la mejora en la actuación de en Mantenimiento se deba realizar.

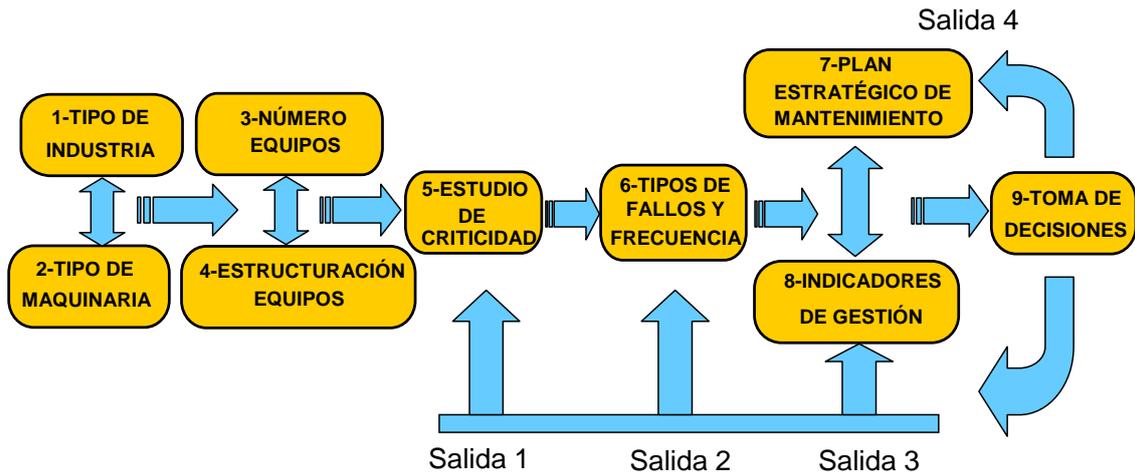


Figura 5.1 Protocolo de Mejora de Metodología RCM a partir del AMFEC e implantación de Mantenimiento Preventivo y Predictivo en Industrias de Procesos.

### 5.3 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Observando las etapas en las que se ha dividido el desarrollo de la mejora del método RCM, las 4 primeras etapas son una aportación nueva al método RCM, que no aportan valor a la detección del modo de fallo o su valoración; pero, ayudan mucho en la etapa de criticidad, donde es necesario tener muy claro los tipos de activos a los cuales se les va a aplicar el RCM y según sea de un tipo o de otro, el enfoque puede ser diferente.

Uno de los centros de gravedad de la figura 5.1 es el cálculo de la criticidad, que como se verá en el capítulo 7, se desarrollan varias formas de calcular qué tan crítico es un activo, para poder intensificar más o menos en RCM.

La etapa 6, ayuda a definir modos de fallos similares de diferentes activos y valorar su frecuencia de aparición. En la etapa 7, es muy necesaria para organizar y ordenar todas las actividades planificadas de Mantenimiento Preventivo y Predictivo que se han definido en las matrices de decisiones, estructuradas por frecuencias, plantas, tecnologías, especialidades, etc.

La etapa 8, determina los indicadores de gestión necesarios para controlar cantidad de aparición de fallos similares y cuantificar sus costes. Con ello, se determina donde hay una repetitividad innecesaria, que debe resolverse.

Para cerrar el ciclo, está la etapa 9, que en función de la información de control de costes e incidencias o fallos, se debe retocar o cambiar parámetros en la etapa de cálculo de criticidad, tipos de fallos y frecuencias, plan estratégico de mantenimiento o indicadores de gestión.

## 6

# ESTRUCTURACIÓN DE ACTIVOS

## 6.1 OBJETIVOS

Dado la gran variedad tecnológica que engloba la industria de procesos; se crea la necesidad de estructurar y agrupar los activos, para que sea de mayor facilidad en el momento de la implantación de la metodología RCM y en especial de los planes de Mantenimiento Preventivo y Predictivo. Dicha agrupación vendrá definida por similitud de características constructivas y funcionales. De tal modo, previo a la agrupación de activos, se definirá el tipo de industria en la cual se requiere realizar la implantación de la metodología RCM.

Posteriormente, se determinarán los niveles de detalle en los que se divide los activos o instalaciones de la industria, que se haya elegido como estudio. Como es lógico, el sector industrial, aparte de estar dividido por tipos de industrias, la forma legal y jurídica de agruparse es en empresas. Por tanto, una vez se defina el sector de industrial de trabajo, se debe definir la empresa donde se realiza el estudio de implantación del método. Una vez llegado al nivel de empresas, se debe establecer la necesidad de llegar a un nivel de detalle superior o inferior; como puede ser, un sistema de bombeo formado por una bomba, dos válvulas, un by-pass, tuberías, bomba de lubricación de la bomba, etc., o llegar al detalle del componente de un elemento de uno de los activos de la empresa; como por ejemplo la junta tórica del cierre mecánico de la bomba.

## 6.2 DESARROLLO ESTRUCTURACIÓN DE ACTIVOS

Se define sistema a todo aquel grupo de elementos que son susceptibles de aplicarle la metodología RCM; se muestra en la serie 6.1 los diferentes niveles a los cuales se puede aplicar RCM.

$$\left\{ S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n \right\} \quad (6.1)$$

Siendo:

- $S_i$  : Nombre del nivel del sistema  $i$  susceptible de aplicar RCM; por ejemplo: tipo de industria, empresa, centro industrial, proceso, equipo, componente,...

Siguiendo la misma estructuración, en cada uno de los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM, se definen sistemas de cada nivel. Ello es definido en la serie 6.2.

$$\begin{aligned} & \left\{ S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1j}, \dots, S_{1m} \right\} \\ & \left\{ S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2j}, \dots, S_{2m} \right\} \\ & \dots \\ & \left\{ S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{ij}, \dots, S_{im} \right\} \\ & \dots \\ & \left\{ S_{n1}, S_{n2}, \dots, S_{nj}, \dots, S_{nm} \right\} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Siendo:

- $S_{ij}$  : Nombre del sistema  $j$  de cada uno de los niveles  $i$ .
- $j$  : Sistemas de cada uno de los niveles.
- $i$  : Niveles para estructurar los activos de una industria.

La cantidad de sistemas que se pueden seleccionar para aplicar la metodología RCM, viene definido por la ecuación 6.3.

$$C_S = \prod_{i=1}^n C_{S_i} + \prod_{i=2}^n C_{S_i} + \dots + \prod_{i=n-1}^n C_{S_i} + C_{S_n} \quad (6.3)$$

Siendo:

- $C_S$ : Cantidad total de sistemas susceptibles de aplicar la metodología RCM.
- $C_{S_i}$ : Cantidad de sistemas de un nivel  $S_i$  susceptibles de aplicar la metodología RCM.

Una vez definidos los niveles de los sistemas susceptibles de aplicar la metodología RCM, es necesario agrupar dichos sistemas por similitud de características. Por tanto, se define:

- $G_i^E$ : Grupos con características similares de cada uno de los sistemas susceptibles de aplicar RCM para cada uno de los niveles.

Realizando el cambio de variable mostrado en la ecuación 6.4, se muestra la ecuación 6.5.

$$C_S^{G_i^E} = \sum_{a_i=1}^{C_{S_i}^{G_i^E}} C_{S_i}^{G_{ia_i}^E} \quad (6.4)$$

$$C_S^{G^E} = \prod_{i=1}^n C_{S_i}^{G_i^E} + \prod_{i=2}^n C_{S_i}^{G_i^E} + \dots + \prod_{i=n-1}^n C_{S_i}^{G_i^E} + C_{S_n}^{G_i^E} \quad (6.5)$$

Siendo:

- $C_S^{G^E}$ : Cantidad total de sistemas susceptibles de aplicar la metodología RCM para todos los grupos y niveles.
- $C_{S_i}^{G_i^E}$ : Cantidad de sistemas de un nivel  $S_i$  susceptibles de aplicar la metodología RCM para todos los grupos  $G^E$  del nivel  $S_i$ .
- $C_{S_i}^{G_{ia_i}^E}$ : Cantidad de sistemas de un nivel  $S_i$  susceptibles de aplicar la metodología RCM para un grupo  $G^E$  del nivel  $S_i$ .

- $C_{G_i^E}$  : Cantidad de grupos de los sistemas de un nivel  $S_i$  .
- $a_i$  : Número de grupo de los sistemas de un nivel  $S_i$  .

### 6.3 CASO DE ESTUDIO SISTEMAS POR NIVELES

Las tablas 6.1 y 6.2, indican un ejemplo de niveles de sistemas y agrupación.

NIVELES		EJEMPLOS DE SISTEMAS POR NIVELES							
1	TIPO DE INDUSTRIA	Nuclear	Petrolera	Petroquímica	Química	Farmacéutica	Alimentaria	Cementera	Siderúrgica
2	SECTOR INDUSTRIAL	Refino de Petróleo	Extracción de Petróleo y Gas Natural	Construcción de Maquinaria	Distribución Energía Eléctrica	Captación de Agua para Suministro	Productos Químicos para Agricultura	Química Fina	Farmacéutica de base
3	EMPRESA	Empresa A	Empresa B	Empresa C	Empresa D	Empresa E	Empresa F	Empresa G	Empresa H
4	PAÍS	EEUU	Canadá	Japón	Alemania	Francia	España	Reino Unido	Italia
5	REGIÓN	Cataluña	Valencia	Madrid	Andalucía	Castilla	País Vasco	Galicia	Asturias
6	CENTRO INDUSTRIAL	C.I. 1	C.I. 2	C.I. 3	C.I. 4	C.I. 5	C.I. 6	C.I. 7	C.I. 8
7	PROCESO	Secundario	Desgasificación	Reacción	Destilación	Depuración	Laminación	Envasado	Almacenaje
8	TIPO DE EQUIPO	Máquinas Rotativas	Transporte	Depósitos	Intercambio de calor	Válvulería	Equipos Electrónicos	Instrumentación	Control
9	EQUIPO	Bomba	Compresor	Reductor	Intercambiador	Reactor	Válvula	Filtro	PLC
10	COMPONENTE	Cierre mecánico	Tren de Engranajes	Carter de Aceite	Homocinética	Pistón hidráulico	Tarjeta	Caudalímetro	Presostato
11	ELEMENTO	Junta Tórica	Membrana	Rueda Dentada	Rodamiento	Eje	Fotocélula	Piezoeléctrico	Cable

Tabla 6.1- Niveles de sistemas y ejemplos

NIVELES		EJEMPLOS DE GRUPOS DE SISTEMAS POR NIVELES							
1	TIPO DE INDUSTRIA	Alta Seguridad		Base Química		Destino final consumidor y construcción			
		Nuclear	Petrolera	Petroquímico	Química	Farmacéutica	Alimentaria	Cementera	Siderúrgica
		Derivados del Petróleo		Maquinaria	Energía y Agua	Derivados Químicos			
2	SECTOR INDUSTRIAL	Refino de Petróleo	Extracción de Petróleo y Gas Natural	Construcción de Maquinaria	Distribución Energía Eléctrica	Captación de Agua para Suministro	Productos Químicos para Agricultura	Química Fina	Farmacéutica de base
3	EMPRESA	Norte	Empresa B	Empresa C	Centro	Empresa E	Sur	Empresa G	Empresa H
4	PAÍS	América del Norte	Canadá	Asia	Europa	Francia	España	Reino Unido	Italia
5	REGIÓN	Levante	Valencia	Centro y Sur	Alemania	Francia	España	Reino Unido	Italia
6	CENTRO INDUSTRIAL	Cataluña	Valencia	Madrid	Andalucía	Castilla	País Vasco	Galicia	Asturias
		Producción			Oficinas		Diseño		
		C.I. 1	C.I. 2	C.I. 3	C.I. 4	C.I. 5	C.I. 6	C.I. 7	C.I. 8
7	PROCESO	Nuclear	Manipulación producto en forma fluidica				Producto sólido	Logística	
		Secundario	Desgasificación	Reacción	Destilación	Depuración	Laminación	Envasado	Almacenaje
		Tipos de Equipos Dinámicos		Tipos de Equipos Estáticos			Tipos de Equipos Eléctricos		
8	TIPO DE EQUIPO	Máquinas Rotativas	Transporte	Depósitos	Intercambio de calor	Válvulería	Equipos Electrónicos	Instrumentación	Control
9	EQUIPO	Equipos rotativos			Equipos de reacción física y química				Equipo Eléctrico
		Bomba	Compresor	Reductor	Intercambiador	Reactor	Válvula	Filtro	PLC
10	COMPONENTE	Estanqueidad	Transmisión de Movimiento				Control de Procesos		
		Cierre mecánico	Tren de Engranajes	Carter de Aceite	Homocinética	Pistón hidráulico	Tarjeta	Caudalímetro	Presostato
		Elemento Polimérico		Elemento Mecánico Metálico			Elemento Eléctrico		
11	ELEMENTO	Junta Tórica	Membrana	Rueda Dentada	Rodamiento	Eje	Fotocélula	Piezoeléctrico	Cable

Tabla 6.2- Ejemplos de grupos de sistemas por niveles

Un listado de atributos de sistemas susceptibles de aplicar la metodología RCM se muestra a continuación:

- a. Función técnica
- b. Función productiva
- c. Dimensión
- d. Peligrosidad
- e. Objeto de consumo

En capítulos posteriores, se hablará de las posibles averías o modos en que puede fallar un sistema. Uno de los niveles más utilizados para aplicar la metodología RCM y, más en concreto, la detección de las averías o modos de fallos es el nivel de *tipos de equipo*. Por ello, la tabla 6.3 muestra la estructura de grupos de tipos y las tablas 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7 los equipos de cada tipo de equipo. Esta estructura es la que se utiliza para definir la aplicación de la implantación de la mejora de la metodología RCM en industrias de procesos.

<b>TIPOS DE EQUIPO</b>
MÁQUINAS ROTATIVAS
INTERCAMBIO DE CALOR
DEPÓSITOS
VALVULERÍA

Tabla 6.3- Sistemas del nivel tipos de equipo

<b>MÁQUINAS ROTATIVAS</b>	<b>INTERCAMBIO DE CALOR</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Soplante</li> <li>Ventilador</li> <li>Agitador</li> <li>Mezclador</li> <li>Bomba</li> <li>Compresor</li> <li>Bomba vacío</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intercambiador de calor</li> <li>Condensador</li> <li>Reboiler</li> <li>Torre Refrigeración</li> <li>Caldera aceite</li> <li>Caldera vapor</li> <li>Frigorífica</li> <li>Climatizador</li> <li>Columna Destilación</li> <li>Scrubber</li> </ul>

Tabla 6.4- Equipos de Máquinas Rotativas    Tabla 6.5- Equipos de intercambio de Calor

<b>DEPÓSITOS</b>
Tanque
Reactor
Recipiente
Tolva
Demister

Tabla 6.6- Equipos de Depósitos

<b>VALVULERÍA</b>
Válvula manual
Válvula de seguridad
Válvula de alivio
Válvula reductora de presión o autorreguladora
Disco de ruptura
Mirilla
Apagallamas
TIV – Válvula control lazo temperatura
LIV – Válvula control lazo nivel
PIV – Válvula control lazo presión
FIV – Válvula control lazo caudal
WIV - Válvula control lazo peso
AIV - Válvula control lazo análisis
HOV – Válvula automática

Tabla 6.7- Equipos de Valvulería

La agrupación de los equipos en estos tipos de equipos, va relacionada con similitudes de funcionamiento, modos y frecuencias de fallos. Esta forma, hace más adecuada y sencilla la mejora de la implantación de la metodología RCM en industrias de procesos. El tipo de equipos Máquinas Rotativas, son aquellos equipos que su función principal la realizan haciendo mover un eje con una serie de accesorios y mecanismo, su objetivo es vehicular, comprimir, mezclar fluido. El tipo de equipo Intercambio de Calor, como su nombre indica, son todos aquellos equipos donde existe transferencia de calor por conducción, convección o radiación; y tienen como fin variar las propiedades térmicas de fluidos que pasan a través de ellos. El tipo de equipo depósitos, son aquellos equipos donde en su estructura albergan una cantidad finita de fluido o materia, puede ser materia prima, producto semielaborado o producto acabado. El tipo de equipo Valvulería, lo forman todo tipo de válvulas de control, regulación y distribución, así como, sus accesorios.

## 6.4 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Tanto el número de sistemas como grupos de sistemas en el caso de estudio son 11, se hace difícil encontrar estudios que utilicen una cantidad similar de niveles; pero, implícitamente hay esa cantidad de niveles, lo que sucede es que la empresa que lo implanta está ubicado en sectores industriales, regiones, tipos de industrias, países, que hace que su estudio empiece en un nivel 6 o 7.

Pero lo interesante del desarrollo de la estructuración de activos, es que se puede y debe estructurar los activos en grupos que definan características similares para implantar más adecuadamente RCM. Por tanto, esta agrupación de activos en sistemas se ha definido y formalizado una forma de cuantificar, para posteriormente mostrar un ejemplo práctico de aplicación.



# 7

## CÁLCULO DE CRITICIDADES

### 7.1 OBJETIVOS

Basándose en los antecedentes que determinan la criticidad de activos, en relación al impacto en seguridad, medio ambiente e indisponibilidad de instalaciones; así como, sus consecuencias económicas; el objetivo del presente capítulo 7 es diseñar métodos de cálculo de la criticidad de activos, tomando como referencia más variables. El objetivo es determinar los recursos de mantenimiento, que se deben aplicar a los activos para que no aparezcan fallos con diferentes impactos.

El objetivo es llegar a la conclusión que expertos en operación de los activos, llegan con su experiencia; pero, determinarlo de forma cuantitativa, metódica, parametrizada, ponderada y sobretodo fiable.

Para ello, se muestra tres métodos de calcular la criticidad de equipos en plantas de procesos:

- a. Cálculo de criticidades según aspectos legales y puntos críticos de las instalaciones.
- b. Cálculo de criticidades según aspectos operativos y niveles de impacto.
- c. Cálculo de criticidades según características de los equipos.

Cada uno de estos métodos muestra una forma de llegar a una valoración ponderada de la criticidad de equipos y con ello poder confeccionar el plan de mantenimiento anual del centro industrial o productivo de estudio.

## 7.2 DESCRIPCIÓN

La base para poder realizar una buena planificación y estrategia de mantenimiento es responder a la pregunta *¿cuánto es cuánto?*. Una vez se ha podido cuantificar cuánto o qué cantidad de crítico es un activo, o elemento en una planta industrial; se estará en disposición de asignar recursos materiales y humanos a la prevención de averías que puedan suceder en dicho activo.

Es importante disponer de un listado de puntos críticos de las instalaciones; así como, de una correcta ponderación del valor de su criticidad. Esto es la base de una óptima planificación de los recursos de mantenimiento, facilitando a que los costes de los mismos se reduzcan y aumente la eficiencia tanto de dicho departamento como otros que colaboren con él, como producción, ingeniería, seguridad, calidad, compras.

Un protocolo adecuado de las actuaciones que realiza el departamento de mantenimiento y una claridad de ideas en el momento de recogida de datos de dicha actuación, facilitará la construcción de una buena base de indicadores de gestión, que ayude a tomar las decisiones adecuadas en el momento justo sobre la estrategia que debe seguir mantenimiento.

El estudio de criticidades de equipos es esencial para estructurar y establecer la estrategia de la actuación de un departamento de mantenimiento. Con este análisis se puede determinar las prioridades en la utilización de los recursos humanos y tecnológicos. El propósito común en una industria de fabricación continuo, es el mínimo de paradas de las plantas al mínimo coste posible; para llegar a la máxima eficiencia.

## **7.3 CÁLCULO DE CRITICIDADES SEGÚN ASPECTOS LEGALES Y PUNTOS CRÍTICOS DE LAS INSTALACIONES**

### **7.3.1 INTRODUCCIÓN**

El primer método para calcular la criticidad, es considerar aspectos por los cuales se debe regir una empresa industrial, como son los aspectos legales y puntos que se consideren críticos en las instalaciones del centro de estudio.

Los aspectos legales de una planta de proceso, son las normas por las cuales hay que regirse y que emite el Ministerio de Industria del Estado Español, como por ejemplo el Real Decreto 1244 (Aparatos a Presión), Real Decreto 1215 (Protección en Máquinas), Accidentes Graves, RD 379 (Almacenamiento de Líquidos Combustibles e Inflamables), etc.

Los puntos críticos son los que se toman como referencia para controlar, detectar, avisar, medir y calcular variables de los procesos. Ya sean niveles, alarmas, instrumentos, instalaciones de protección contra incendios, elementos de seguridad, rutas de servicios, etc. Son los puntos más críticos de las plantas de estudio y pueden afectar a la seguridad y medio ambiente, calidad del producto, fabricación, mantenimiento de instalaciones.

Cuando se eligen estos conceptos se pondera la criticidad de forma relativa entre unos y otros. Se selecciona a que equipos afecta cada uno y se calcula a través de la suma la valoración de la criticidad resultante a cada equipo. Es ya con este valor con el que se pueden tomar decisiones de la estrategia a seguir en la planificación de mantenimiento.

### **7.3.2 DESARROLLO Y PROCESO DE CÁLCULO**

El desarrollo del cálculo de la criticidad de sistemas, se basa en dos conceptos los cuales son:

- a. Aspectos Legales

## b. Puntos Críticos

Cada uno de ellos dispondrá de un listado de requisitos, normas, acciones, condiciones, etc., por las cuales se define y se valora su criticidad. Para cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar la metodología RCM, existen diferentes requisitos, normas, acciones, condiciones, etc. De tal modo, se define en las series 7.1 y 7.2 los aspectos legales y puntos críticos por niveles de sistemas.

$$\begin{aligned}
 & \left\{ L_{S_1,1}^C, L_{S_1,2}^C, \dots, L_{S_1,b_1}^C, \dots, L_{S_1,C_{L_{S_1}^c}}^C \right\} \\
 & \left\{ L_{S_2,1}^C, L_{S_2,2}^C, \dots, L_{S_2,b_2}^C, \dots, L_{S_2,C_{L_{S_2}^c}}^C \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ L_{S_i,1}^C, L_{S_i,2}^C, \dots, L_{S_i,b_i}^C, \dots, L_{S_i,C_{L_{S_i}^c}}^C \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ L_{S_n,1}^C, L_{S_n,2}^C, \dots, L_{S_n,b_n}^C, \dots, L_{S_n,C_{L_{S_n}^c}}^C \right\}
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

$$\begin{aligned}
 & \left\{ P_{S_1,1}^C, P_{S_1,2}^C, \dots, P_{S_1,c_1}^C, \dots, P_{S_1,C_{P_{S_1}^c}}^C \right\} \\
 & \left\{ P_{S_2,1}^C, P_{S_2,2}^C, \dots, P_{S_2,c_2}^C, \dots, P_{S_2,C_{P_{S_2}^c}}^C \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ P_{S_i,1}^C, P_{S_i,2}^C, \dots, P_{S_i,c_i}^C, \dots, P_{S_i,C_{P_{S_i}^c}}^C \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ P_{S_n,1}^C, P_{S_n,2}^C, \dots, P_{S_n,c_n}^C, \dots, P_{S_n,C_{P_{S_n}^c}}^C \right\}
 \end{aligned} \tag{7.2}$$

Siendo:

- $L_{S_i b_i}^C$  : Aspectos legales de cada nivel y cada sistema susceptibles de aplicar RCM.
- $P_{S_i c_i}^C$  : Puntos críticos de cada nivel y cada sistema susceptibles de aplicar RCM.
- $b_i$  : Número de aspecto legal de sistemas del nivel  $i$ .
- $c_i$  : Número de punto crítico de sistemas del nivel  $i$ .
- $C_{L_{S_i}^C}$  : Cantidad de aspectos legales de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{P_{S_i}^C}$  : Cantidad de puntos críticos de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Para conocer la cantidad de aspectos legales y puntos críticos de todos los niveles de los sistemas de forma genérica, para todos los sistemas se debe recurrir a las ecuaciones 7.3 y 7.4.

$$C_{L^C} = \sum_{i=1}^n C_{L_{S_i}^C} \quad (7.3)$$

$$C_{P^C} = \sum_{i=1}^n C_{P_{S_i}^C} \quad (7.4)$$

Siendo:

- $C_{L^C}$  : Cantidad de aspectos legales de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{P^C}$  : Cantidad de puntos críticos de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $S_i$  : Niveles de los sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Para conocer la cantidad de aspectos legales y puntos críticos de todos los niveles de los sistemas, calculado para cada uno de los sistemas de cada uno de los niveles, se debe recurrir a las ecuaciones 7.5 y 7.6.

$$C_{L^C}^M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{L_{S_{ij}}}^M \quad (7.5)$$

$$C_{P^C}^M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{P_{S_{ij}}}^M \quad (7.6)$$

Siendo:

- $C_{L^C}^M$  : Cantidad de aspectos legales de todos los niveles, por sistemas, de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{L_{S_{ij}}}^M$  : Cantidad de aspectos legales de cada nivel y cada sistema susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{P^C}^M$  : Cantidad de puntos críticos de todos los niveles, por sistemas, de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{P_{S_{ij}}}^M$  : Cantidad de puntos críticos de cada nivel y cada sistema susceptibles de aplicar RCM.
- $S_i$  : Niveles de los sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Sea:

- $V_{L_{S_{ij}}}^M$  : Valor de criticidad del aspecto legal  $L_{S_{ij}}^C$  .
- $V_{P_{S_{ij}}}^M$  : Valor de criticidad del punto crítico  $P_{S_{ij}}^C$  .
- $V_{L_{S_i}}^C$  : Valor de criticidad de aspectos legales, para cada nivel  $S_i$  para todos los sistemas  $S_{ij}$  .
- $V_{P_{S_i}}^C$  : Valor de criticidad de puntos críticos, para cada nivel  $S_i$  para todos los sistemas  $S_{ij}$  .

El valor de criticidad calculado con el método de aspectos legales y puntos críticos, para un sistema  $S_{ij}$  de un nivel  $S_i$  , es como se indica en la ecuación 7.7.

$$R_{S_{ij}}^L = \left( \sum_{b_i=1}^{C_{L_{S_i}^C}} V_{L_{S_{ij}}^C} \cdot P_{L_{S_{ij}}^C} + \sum_{c_i=1}^{C_{P_{S_i}^C}} V_{P_{S_{ij}}^C} \cdot P_{P_{S_{ij}}^C} \right)_{S_{ij}} \quad (7.7)$$

Siendo:

- $R_{S_{ij}}^L$  : Valor de criticidad de un sistema  $S_{ij}$ , por el método de aspectos legales y puntos críticos.
- $P_{L_{S_{ij}}^C}$  : 1 ó 0, según corresponda la existencia o no del aspecto legal  $L_{S_i}^C$  para el sistema  $S_{ij}$ .
- $P_{P_{S_{ij}}^C}$  : 1 ó 0, según corresponda la existencia o no del aspecto legal  $P_{S_i}^C$  para el sistema  $S_{ij}$ .

Una vez se ha definido la criticidad, es el momento de establecer niveles de severidad de criticidad por los cuales se considera que un sistema es más o menos crítico que otro. Para ello, se define en la serie 7.8 niveles de criticidad para niveles de sistemas.

$$\left\{ N_{S_1,1}^L, N_{S_1,2}^L, \dots, N_{S_1,g_1}^L, \dots, N_{S_1,C_{N_{S_1}^L}}^L \right\}$$

$$\left\{ N_{S_2,1}^L, N_{S_2,2}^L, \dots, N_{S_2,g_2}^L, \dots, N_{S_2,C_{N_{S_2}^L}}^L \right\}$$

...

$$\left\{ N_{S_i,1}^L, N_{S_i,2}^L, \dots, N_{S_i,g_i}^L, \dots, N_{S_i,C_{N_{S_i}^L}}^L \right\}$$

...

$$\left\{ N_{S_n,1}^L, N_{S_n,2}^L, \dots, N_{S_n,g_n}^L, \dots, N_{S_n,C_{N_{S_n}^L}}^L \right\}$$

(7.8)

Siendo:

- $N_{S_i,g_i}^L$  : Nivel de criticidad.
- $g_i$  : Número del nivel de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

- $C_{N_{S_i}^L}$  : Cantidad de niveles de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Sea:

- $V_{N_{S_i}^L}^I$  : Valor inferior del nivel de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $V_{N_{S_i}^L}^S$  : Valor superior del nivel de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Se cumple el sistema de ecuaciones 7.9.

$$\left\{ V_{N_{S_1}^L}^I = 0; \quad V_{N_{S_2}^L}^I = V_{N_{S_1}^L}^S + 1; \quad V_{N_{S_3}^L}^I = V_{N_{S_2}^L}^S + 1; \quad \dots; \quad V_{N_{S_i}^L}^I = V_{N_{S_{i-1}}^L}^S + 1 \right\} \quad (7.9)$$

### 7.3.3 CASO DE ESTUDIO

Debido a la rigurosidad de las normas que velan por la seguridad de la industria de procesos, se utiliza en este caso de estudio, el modelo de cálculo de criticidad de aspectos legales y puntos críticos. Es muy útil para tener una imagen de la importancia que conlleva trabajar con productos corrosivos, cancerígenos, abrasivos, inflamables y explosivos.

Las tablas 7.1 y 7.2 muestran los aspectos legales y los puntos críticos de una planta de proceso del sector químico. En ellas se pueden observar qué conceptos se trabajan para calcular la criticidad de equipos.

En el caso que se puede observar en la tabla 7.3, se muestra un valor de número de aspectos legales de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM y un valor de número de puntos críticos de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM:

$$C_{LC} = 7$$

$$C_{PC} = 19$$

Haciendo referencia a la tabla 6.1, el nivel de sistemas del caso de estudio pertenece al de *Equipo*. Por tanto, el nivel de los sistemas de caso de estudio es:

$$i = 9$$

$$S_i = S_9 = \text{Equipo}$$

Los aspectos legales de cada nivel y cada sistema susceptibles de aplicar RCM; así como, los puntos críticos son, se corresponden con las siguientes variables:

$$L^C_{S_9 b_9}$$

$$P^C_{S_9 b_9}$$

Las variables de valor de criticidad de aspectos legales, para cada nivel  $S_i$  para todos los sistemas  $S_{ij}$ , y valor de criticidad de puntos críticos, para cada nivel  $S_i$  para todos los sistemas  $S_{ij}$ , son los que se muestran en la tabla 7.3.

$b_9$	ASPECTOS LEGALES	$L^C_{S_9 b_9}$	CRITICIDAD	$V^C_{L^C_{S_9 b_9}}$
1	APQ		4	
2	REBT		4	
3	APARATOS A PRESIÓN		5	
4	RD-1215		2	
5	ISO 9000 RUTA MECÁNICA		1	
6	ISO 9000 RUTA INSTRUMENTACIÓN		2	
7	ISO 9000 RUTA CCM		1,5	

Tabla 7.1- Aspectos legales para el cálculo de la criticidad

$c_9$	PUNTOS CRÍTICOS	$P^C_{S_9b_9}$	CRITICIDAD	$V^C_{P^C_{S_9b_9}}$
1	RUTA SEGURIDAD		3	
2	RUTA INSTRUMENTOS		4	
3	MANGUERAS CARGA / DESCARGA		8	
4	NIVELES		4	
5	PUENTES ELECTROESTÁTICOS		2	
6	TOMAS A TIERRA		1	
7	GRUPOS DE FRÍO		4	
8	OSMOSIS		3	
9	SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS		6	
10	DEPURADORA		5	
11	SERVICIOS		3	
12	HOJA DE ENGRASE		0,5	
13	PLANTA PILOTO		0,5	
14	INSTALACIÓN DE BT		3	
15	INSTALACIÓN DE AT		2	
16	AUDITORÍA ELÉCTRICA		3	
17	FUGAS		2	
18	CIRCUITOS AGUA SANITARIA		2	
19	CIRCUITOS AGUAS TORRES REFRIGERACIÓN		4	

Tabla 7.2- Puntos críticos para el cálculo de la criticidad



Si se quiere realizar un cálculo de criticidad donde los resultados obtenidos atraviesen la barrera de cualitativos y entren en una valoración cuantitativa y más precisa; se puede observar el apartado 7.5.

## **7.4 CÁLCULO DE CRITICIDADES SEGÚN ASPECTOS OPERATIVOS Y NIVELES DE IMPACTO**

### **7.4.1 INTRODUCCIÓN**

El presente método de cálculo de criticidades, se basa en la valoración numérica de variables que definen la criticidad de un sistema, por medio de aspectos operativos que rigen la política de un sector industrial o de una compañía. Cada aspecto operativo, dispone de una cantidad de niveles de impacto; según afecte más o menos dicho aspecto operativo en el sistema de estudio.

Para poder valorar numéricamente los aspectos operativos y los niveles de impacto, se utilizan tablas donde se define con un valor numérico, la criticidad del nivel de impacto del aspecto operativo correspondiente al sistema que se está calculado la criticidad. Una vez se dispone de la tabla, es cuando se debe utilizar para definir la criticidad de sistemas.

Dicho método, se puede utilizar para cualquier nivel de sistemas susceptibles de aplicar metodología RCM. De hecho, es este método el más adecuado para definir la criticidad de sistemas de diferentes niveles; hasta llegar a un nivel de sistemas que se considere que ya es adecuado aplicar toda la metodología RCM.

Para cada nivel de sistemas, los valores numéricos de las variables que definen la criticidad de sistemas a través de los niveles de impactos de los aspectos operativos, varían en función del nivel con el que se trabaje. Esto, es debido a que si se elige un nivel de sistemas alrededor del uno; como por ejemplo, sector industrial, se encuentra la situación que la valoración de un aspecto operativo como puede ser la seguridad, tenga un criterio mucho más elevado en consecuencias a personas, medio ambiente y a la economía; que no sistemas de niveles de los más bajos, donde el valor de la criticidad del aspecto operativo seguridad, para elementos tiene un criterio menor en

consecuencias a personas, medio ambiente y economía. En el apartado 7.4.3 se puede observar un caso de estudio donde, donde se explica este fenómeno.

## 7.4.2 DESARROLLO Y PROCESO DE CÁLCULO

Como se ha comentado en el apartado anterior, el presente método de cálculo de criticidad se basa en:

- a. Aspectos operativos
- b. Niveles de impacto de cada uno de estos aspectos operativos.

Por ello, se definen los aspectos operativos y los niveles de impacto en las series 7.10 y 7.11.

$$\begin{aligned}
 & \left\{ A_{S_1,1}^C, A_{S_1,2}^C, \dots, A_{S_1,d_1}^C, \dots, A_{S_1,C_{A_{S_1}^C}}^C \right\} \\
 & \left\{ A_{S_2,1}^C, A_{S_2,2}^C, \dots, A_{S_2,d_2}^C, \dots, A_{S_2,C_{A_{S_2}^C}}^C \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ A_{S_i,1}^C, A_{S_i,2}^C, \dots, A_{S_i,d_i}^C, \dots, A_{S_i,C_{A_{S_i}^C}}^C \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ A_{S_n,1}^C, A_{S_n,2}^C, \dots, A_{S_n,d_n}^C, \dots, A_{S_n,C_{A_{S_n}^C}}^C \right\}
 \end{aligned} \tag{7.10}$$

$$\begin{aligned}
 & \left\{ I_{S_1,1}^C, I_{S_1,2}^C, \dots, I_{S_1,e_1}^C, \dots, I_{S_1,C_{I_{S_1}^C}}^C \right\} \\
 & \left\{ I_{S_2,1}^C, I_{S_2,2}^C, \dots, I_{S_2,e_2}^C, \dots, I_{S_2,C_{I_{S_2}^C}}^C \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ I_{S_i,1}^C, I_{S_i,2}^C, \dots, I_{S_i,e_i}^C, \dots, I_{S_i,C_{I_{S_i}^C}}^C \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ I_{S_n,1}^C, I_{S_n,2}^C, \dots, I_{S_n,e_n}^C, \dots, I_{S_n,C_{I_{S_n}^C}}^C \right\}
 \end{aligned} \tag{7.11}$$

Siendo:

- $A_{S_i,d_i}^C$ : Aspectos operativos de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

- $I_{S_i, e_i}^C$  : Niveles de impacto de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $d_i$  : Número de aspecto operativo de sistemas del nivel  $i$ .
- $e_i$  : Número de nivel de impacto de sistemas del nivel  $i$ .
- $C_{A_{S_i}^C}$  : Cantidad de aspectos operativos de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{I_{S_i}^C}$  : Cantidad de niveles de impacto de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Para conocer la cantidad de aspectos operativos y niveles de impacto de todos los niveles de los sistemas de forma genérica, para todos los sistemas se debe recurrir a las ecuaciones 7.12 y 7.13.

$$C_{A^C} = \sum_{i=1}^n C_{A_{S_i}^C} \quad (7.12)$$

$$C_{I^C} = \sum_{i=1}^n C_{I_{S_i}^C} \quad (7.13)$$

Siendo:

- $C_{A^C}$  : Cantidad de aspectos operativos de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{I^C}$  : Cantidad de niveles de impacto de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $S_i$  : Niveles de los sistemas susceptibles de aplicar RCM.

El cálculo del valor de criticidad de sistemas, con el método de aspectos operativos, se realiza de forma empírica y es a razón de la experiencia de técnicos e ingenieros que se determina un valor de dicha criticidad. Por ello, existen numerosas formas de valorar las variables de criticidad de sistemas. De tal modo se define en la serie 7.14 métodos de valoración de variables de criticidad.

$$T_1^C, T_2^C, \dots, T_f^C, \dots, T_F^C \quad (7.14)$$

Siendo:

- $T_f^C$  : Método de valoración de variables de criticidad.
- $F$  : Cantidad de métodos de valoración de variables de criticidad.

Sea:

- $\left( \begin{matrix} I_{S_i e_i}^C \\ A_{S_i d_i}^C \\ T_f^C \end{matrix} \right)$  : Valor de criticidad de un método de valoración de variables de criticidad, para un aspecto operativo y un nivel de impacto concreto y un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM dado.

El valor de criticidad de un sistema de un nivel concreto, viene expresado mediante la ecuación 7.15.

$$\left( \begin{matrix} A \\ S_{ij} \\ T_f^C \end{matrix} \right) = \sum_{d_i=1}^{C_{A_{S_i}^C}} \sum_{e_i=1}^{C_{I_{S_i}^C}} \left( \begin{matrix} I_{S_i e_i}^C \\ A_{S_i d_i}^C \\ T_f^C \end{matrix} \right) \cdot P_{I_{S_i d_i e_i}^C} \quad (7.15)$$

Siendo:

- $\left( \begin{matrix} A \\ S_{ij} \\ T_f^C \end{matrix} \right)$  : Criticidad de un sistema de un nivel concreto, para un método de valoración de variables de criticidad escogido.
- $P_{I_{S_i d_i e_i}^C}$  : 1 ó 0, según corresponda el nivel de impacto del aspecto operativo correspondiente al sistema  $S_{ij}$ .

Una vez se ha definido la criticidad, es el momento de establecer grupos de severidad de criticidad, por los cuales se considera que un sistema es más o menos crítico que otro. Para ello, se define en la serie 7.16 niveles de criticidad para niveles de sistemas.

$$\begin{aligned}
 & \left\{ N_{S_1 1}^A, N_{S_1 2}^A, \dots, N_{S_1 h_1}^A, \dots, N_{S_1 C_{N_{S_1}^A}}^A \right\} \\
 & \left\{ N_{S_2 1}^A, N_{S_2 2}^A, \dots, N_{S_2 h_2}^A, \dots, N_{S_2 C_{N_{S_2}^A}}^A \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ N_{S_i 1}^A, N_{S_i 2}^A, \dots, N_{S_i h_i}^A, \dots, N_{S_i C_{N_{S_i}^A}}^A \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ N_{S_n 1}^A, N_{S_n 2}^A, \dots, N_{S_n h_n}^A, \dots, N_{S_n C_{N_{S_n}^A}}^A \right\}
 \end{aligned} \tag{7.16}$$

Siendo:

- $N_{S_i h_i}^A$  : Grupo de severidad de criticidad.
- $h_i$  : Número del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{N_{S_i}^A}$  : Cantidad de grupos de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Sea:

- $V_{N_{S_i h_i}^A}^I$  : Valor inferior del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $V_{N_{S_i h_i}^A}^S$  : Valor superior del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Se cumple el sistema de ecuaciones 7.17.

$$\left\{ V_{N_{S_i 1}^A}^I = 0; V_{N_{S_i 2}^A}^I = V_{N_{S_i 1}^A}^S + 1; V_{N_{S_i 3}^A}^I = V_{N_{S_i 2}^A}^S + 1; \dots; V_{N_{S_i C_{N_{S_i}^A}}^A}^I = V_{N_{S_i C_{N_{S_i}^A} - 1}^A}^S + 1 \right\} \tag{7.17}$$

### 7.4.3 CASO DE ESTUDIO

El caso que se muestra, trata de cómo se establecen las criticidades de niveles de sistemas de una empresa dedicada a la fabricación de productos químicos.

Los aspectos operativos utilizados son:

- a. Seguridad.
- b. Calidad.
- c. Producción.
- d. Mantenimiento.

Y los niveles de impacto:

- a. Gran impacto.
- b. Impacto considerable.
- c. Impacto normal.
- d. Impacto reducido o nulo.

Los niveles de los sistemas con los que se trabajan son:

$$S_7 = \text{proceso}$$

$$S_8 = \text{tipo de equipo}$$

$$S_9 = \text{equipo}$$

Se definen 3 métodos de cálculo de variables de criticidad:

- a. Logarítmica.
- b. Números Primos.
- c. Base 2.

Los valores de criticidad de cada uno de estos tres métodos, se muestran en las tablas 7.4, 7.5 y 7.6.

<b>MÉTODO LOGARÍTMICA</b>				
NIVEL IMPACTO	ASPECTOS OPERATIVOS			
	SEGURIDAD	CALIDAD	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO
Gran impacto	1000	8	6	4
Impacto considerable	100	7	5	3
Impacto normal	10	6	4	2
Impacto reducido o nulo	1	1	1	1

Tabla 7.4- Valores de criticidad del método de cálculo Logarítmica

<b>MÉTODO NÚMEROS PRIMOS</b>				
NIVEL IMPACTO	ASPECTOS OPERATIVOS			
	SEGURIDAD	CALIDAD	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO
Gran impacto	125	64	27	8
Impacto considerable	25	16	9	4
Impacto normal	5	4	3	2
Impacto reducido o nulo	1	1	1	1

Tabla 7.5- Valores de criticidad del método de cálculo Números Primos

<b>MÉTODO BASE 2</b>				
NIVEL IMPACTO	ASPECTOS OPERATIVOS			
	SEGURIDAD	CALIDAD	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO
Gran impacto	4096	512	64	8
Impacto considerable	256	64	16	4
Impacto normal	16	8	4	2
Impacto reducido o nulo	1	1	1	1

Tabla 7.6- Valores de criticidad del método de cálculo Base 2

Para poder escoger uno u otro método de cálculo de la criticidad, se realiza una comparación. Consiste en escoger una serie de procesos de un centro industrial o productivo y ordenar la criticidad resultante bajo cada uno de los métodos propuestos en las tablas 7.4, 7.5 y 7.6. Se numera la posición resultante de la criticidad, de cada unas de los procesos para cada método de cálculo, y se compara con las demás.

El método que tenga menos dispersión respecto los demás será el escogido. Para ello, se suman las variaciones de posiciones de criticidad de cada uno de los procesos, para cada uno de los métodos de cálculo respecto al método de cálculo de referencia. Se repite dicha operación, para todos los métodos de cálculo y es de esta forma que

aparece un valor que indica la variación o dispersión de un método de cálculo respecto de los demás.

Dicho proceso de comparación, se puede observar en las ecuaciones 7.18, 7.19 y 7.20; así como las gráficas 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4.

$$C_{LOGARÍTMICA}^C = \sum_{w=1}^W \sum_{v=1}^V |y_v^L - x_{vw}^L| \quad (7.18)$$

$$C_{PRIMOS}^C = \sum_{w=1}^W \sum_{v=1}^V |y_v^P - x_{vw}^P| \quad (7.19)$$

$$C_{BASE2}^C = \sum_{w=1}^W \sum_{v=1}^V |y_v^{B2} - x_{vw}^{B2}| \quad (7.20)$$

Siendo:

- $C_{LOGARÍTMICA}^C$  : Valor indicativo de la dispersión del método *Logarítmica* respecto los demás.
- $C_{PRIMOS}^C$  : Valor indicativo de la dispersión del método *Números Primos* respecto los demás.
- $C_{BASE2}^C$  : Valor indicativo de la dispersión del método *Base2* respecto los demás.
- $V$  : Cantidad de procesos con los cuales se realiza el estudio de comparación.
- $W$  : Cantidad de métodos de cálculo de la criticidad con los cuales hay que compararse.
- $v$  : Número del proceso.
- $w$  : Número del método de cálculo.
- $y_v^L$  : Posición ordenada del valor de criticidad, del método de cálculo de referencia que es *Logarítmica*.
- $y_v^P$  : Posición ordenada del valor de criticidad, del método de cálculo de referencia que es *Número Primos*.
- $y_v^{B2}$  : Posición ordenada del valor de criticidad, del método de cálculo de referencia que es *Base2*.

- $x_{vw}^L$ : Posición ordenada del valor de criticidad de cada uno de los proceso y de cada uno de los métodos de cálculo, respecto al de referencia que es *Logarítmica*.
- $x_{vw}^P$ : Posición ordenada del valor de criticidad de cada uno de los proceso y de cada uno de los métodos de cálculo, respecto al de referencia que es *Número Primos*.
- $x_{vw}^{B2}$ : Posición ordenada del valor de criticidad de cada uno de los proceso y de cada uno de los métodos de cálculo, respecto al de referencia que es *Base2*.

De cara a simplificar la denominación del valor de criticidad de variables de aspectos operativos y niveles de impacto, se muestra la tabla 7.7 donde se indica las abreviaturas de aspectos operativos y grado de los niveles de impacto. Adecuado para facilitar el proceso de cálculo del valor de criticidad de cada uno de los sistemas del caso de estudio.

SEGURIDAD	S
CALIDAD	C
PRODUCCIÓN	P
MANTENIMIENTO	M
Gran impacto	1
Impacto considerable	2
Impacto normal	3
Impacto reducido o nulo	4

Tabla 7.7- Abreviaturas de aspectos operativos y grado de nivel de impacto

La tabla 7.8, muestra los procesos que se utilizan para el caso de estudio de una industria de procesos, con sus valores de criticidad para cada uno de los 3 métodos de cálculo. La posición en que están colocados los procesos, es la posición ordenada de la criticidad de mayor a menor, por el método de Base2.

Las abreviaturas de los métodos de cálculo son:

- Logarítmica = L
- Números Primos = Pr
- Base2 = B

La tabla 7.9, indica las posiciones ordenadas de la criticidad de los procesos, de cada uno de los métodos de cálculo; la posición del proceso que queda respecto al método de cálculo de referencia y el valor absoluto de la variación de la posición de la criticidad, de cada proceso de cada método de cálculo respecto al que se toma de referencia, para cada método de cálculo.

Con los valores absolutos de la tabla 7.9, es como se confeccionan las gráficas 7.1, 7.2 y 7.3. Las cuales representan, la variación de posición de cada proceso por cada método de cálculo de la criticidad, respecto a un método de cálculo de la criticidad de referencia; todo ello, para todos los métodos de cálculo de la criticidad mencionados en el caso de estudio.

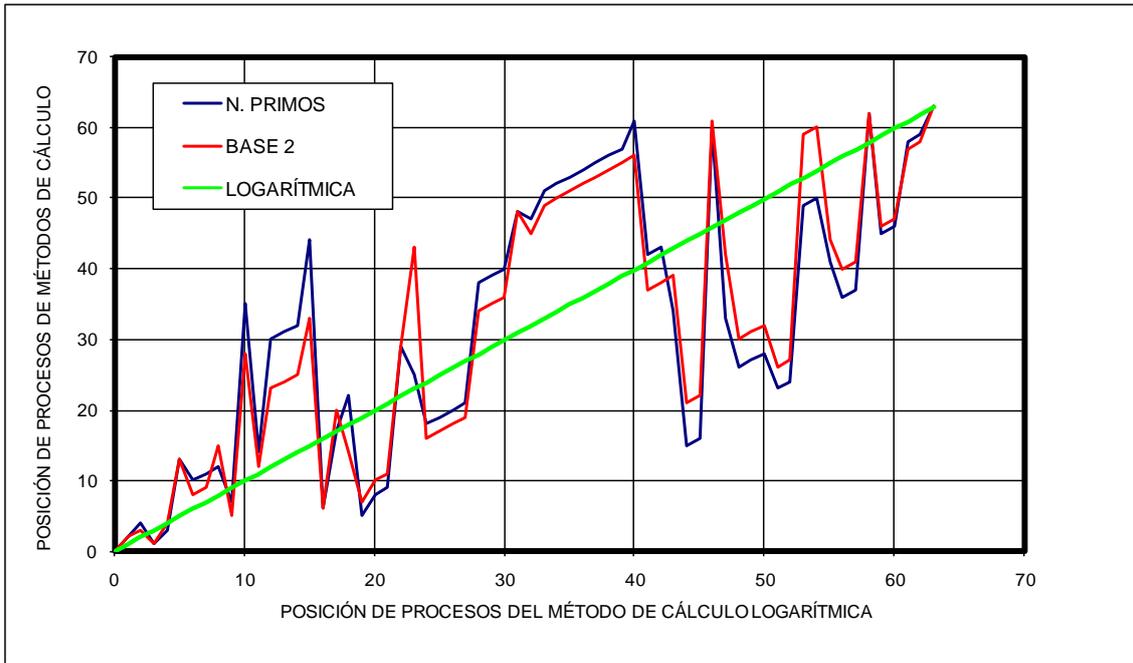
## CRITICIDAD DE PROCESOS POR LOS 4 MÉTODOS

PROCESOS	ASPECTOS OPERATIVOS				CRITICIDAD POR MÉTODOS DE CÁLCULO		
	S	C	P	M	LOGARÍTMICA	Nº PRIMOS	BASE 2
MP 1	1	1	1	2	144.000	864.000	536.870.912
MP 2	1	1	1	3	96.000	432.000	268.435.456
A1	1	1	1	4	48.000	216.000	134.217.728
A2	1	1	2	3	80.000	144.000	67.108.864
A3	1	1	2	3	80.000	144.000	67.108.864
A4	1	2	1	2	126.000	216.000	67.108.864
A5	1	2	1	2	126.000	216.000	67.108.864
B1	2	1	1	1	19.200	345.600	67.108.864
B2	2	1	1	2	14.400	172.800	33.554.432
B3	2	1	1	2	14.400	172.800	33.554.432
B4	2	1	1	2	14.400	172.800	33.554.432
C1	2	1	1	2	14.400	172.800	33.554.432
C2	2	1	1	2	14.400	172.800	33.554.432
C3	2	1	1	2	14.400	172.800	33.554.432
C4	2	1	1	2	14.400	172.800	33.554.432
C5	2	1	1	3	9.600	86.400	16.777.216
B5	1	3	1	2	108.000	54.000	8.388.608
B6	1	3	1	2	108.000	54.000	8.388.608
D1	2	1	2	2	12.000	57.600	8.388.608
D2	1	2	3	2	84.000	24.000	4.194.304
D3	1	1	4	4	8.000	8.000	2.097.152
D4	1	2	3	3	56.000	12.000	2.097.152
ALMACENAMIENTO 1	1	3	2	2	90.000	18.000	2.097.152
ALMACENAMIENTO 2	1	3	2	2	90.000	18.000	2.097.152
ALMACENAMIENTO 3	1	3	1	4	36.000	13.500	2.097.152
ALMACENAMIENTO 4	1	4	1	1	24.000	27.000	2.097.152
ALMACENAMIENTO 5	1	4	1	1	24.000	27.000	2.097.152
ALMACENAMIENTO 6	2	1	3	2	9.600	19.200	2.097.152
ALMACENAMIENTO 7	2	1	3	2	9.600	19.200	2.097.152
ALMACENAMIENTO 8	2	1	3	2	9.600	19.200	2.097.152
ALMACENAMIENTO 9	3	1	1	2	1.440	34.560	2.097.152
ALMACENAMIENTO 10	1	3	2	3	60.000	9.000	1.048.576
ALMACENAMIENTO 11	1	3	2	3	60.000	9.000	1.048.576
ALMACENAMIENTO 12	1	3	2	3	60.000	9.000	1.048.576
ALMACENAMIENTO 13	2	1	3	3	6.400	9.600	1.048.576
ALMACENAMIENTO 14	3	1	1	3	960	17.280	1.048.576
ALMACENAMIENTO 15	1	3	3	2	72.000	6.000	524.288
ALMACENAMIENTO 16	1	3	3	2	72.000	6.000	524.288
SERVICIOS 1	3	1	2	2	1.200	11.520	524.288
SERVICIOS 2	3	1	2	2	1.200	11.520	524.288
SERVICIOS 3	3	1	2	2	1.200	11.520	524.288
SERVICIOS 4	1	3	3	3	48.000	3.000	262.144
SERVICIOS 5	1	3	3	3	48.000	3.000	262.144
SERVICIOS 6	2	1	4	3	1.600	3.200	262.144
SERVICIOS 7	2	2	3	2	8.400	4.800	262.144
SERVICIOS 8	2	2	3	2	8.400	4.800	262.144
SERVICIOS 9	2	2	3	2	8.400	4.800	262.144
SERVICIOS 10	2	2	3	2	8.400	4.800	262.144
SERVICIOS 11	2	1	4	4	800	1.600	131.072
SERVICIOS 12	2	4	1	1	2.400	5.400	131.072
SERVICIOS 13	3	1	3	3	640	1.920	65.536
SERVICIOS 14	3	2	2	2	1.050	2.880	65.536
SERVICIOS 15	1	4	4	1	4.000	1.000	32.768
E1	1	4	4	1	4.000	1.000	32.768
E2	3	2	2	3	700	1.440	32.768
E3	3	2	2	3	700	1.440	32.768
E4	1	4	4	2	3.000	500	16.384
E5	2	4	3	1	1.600	600	8.192
E6	3	3	2	2	900	720	8.192
E7	3	3	2	3	600	360	4.096
E8	4	1	3	3	64	384	4.096
E9	4	1	3	4	32	192	2.048
E10	3	2	4	4	70	80	1.024
E11	4	4	4	3	2	2	2

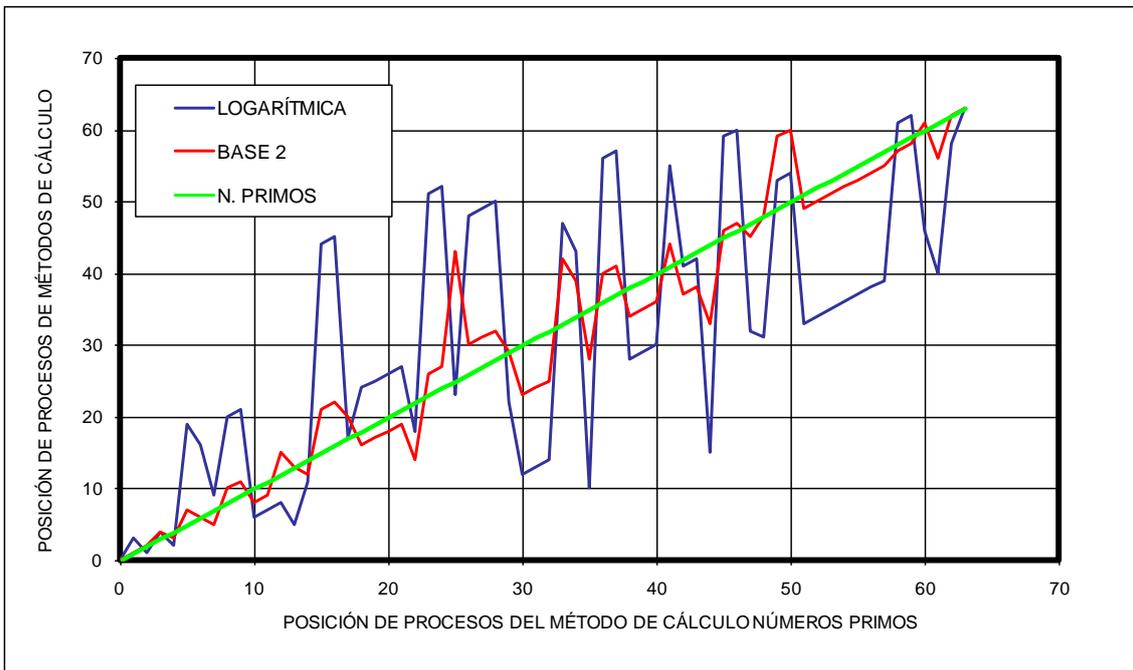
Tabla 7.8- Criticidad de procesos por los 3 métodos de cálculo

POSICIONES ORDENADAS DE LA CRITICIDAD DE LOS PROCESOS																		
PROCESOS	ORDENADOS DE CRITICIDAD												VARIACIÓN POSICIONES					
	L				Pr				B				L		Pr		B	
	L	Bi	Pr	B	Pr	Bi	L	B	B	Bi	L	Pr	Pr	B	L	B	L	Pr
MP 1	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	0	0	0	0	0	0
MP 2	62	57	59	58	62	62	58	62	62	62	58	62	3	4	4	0	4	0
A1	61	56	58	57	61	36	40	56	61	61	46	60	3	4	21	5	15	1
A2	60	53	46	47	60	61	46	61	60	60	54	50	14	13	14	1	6	10
A3	59	52	45	46	59	57	62	58	59	59	53	49	14	13	3	1	6	10
A4	58	62	62	62	58	56	61	57	58	57	62	59	4	4	3	1	4	1
A5	57	50	37	41	57	35	39	55	57	56	61	58	20	16	18	2	4	1
B1	56	49	36	40	56	34	38	54	56	36	40	61	20	16	18	2	16	5
B2	55	55	41	44	55	33	37	53	55	35	39	57	14	11	18	2	16	2
B3	54	60	50	60	54	32	36	52	54	34	38	56	4	6	18	2	16	2
B4	53	59	49	59	53	31	35	51	53	33	37	55	4	6	18	2	16	2
C1	52	45	24	27	52	30	34	50	52	32	36	54	28	25	18	2	16	2
C2	51	44	23	26	51	29	33	49	51	31	35	53	28	25	18	2	16	2
C3	50	48	28	32	50	60	54	60	50	30	34	52	22	18	4	10	16	2
C4	49	47	27	31	49	59	53	59	49	29	33	51	22	18	4	10	16	2
C5	48	46	26	30	48	28	31	48	48	28	31	48	22	18	17	0	17	0
B5	47	54	33	42	47	27	32	45	47	53	60	46	14	5	15	2	13	1
B6	46	61	60	61	46	53	60	47	46	52	59	45	14	15	14	1	13	1
D1	45	43	16	22	45	52	59	46	45	27	32	47	29	23	14	1	13	2
D2	44	42	15	21	44	14	15	33	44	55	55	41	29	23	29	11	11	3
D3	43	51	34	39	43	41	42	38	43	58	23	25	9	4	1	5	20	18
D4	42	41	43	38	42	40	41	37	42	54	47	33	1	4	1	5	5	9
ALMACENAMIENTO 1	41	40	42	37	41	55	55	44	41	50	57	37	1	4	14	3	16	4
ALMACENAMIENTO 2	40	36	61	56	40	26	30	36	40	49	56	36	21	16	10	4	16	4
ALMACENAMIENTO 3	39	35	57	55	39	25	29	35	39	51	43	34	18	16	10	4	4	5
ALMACENAMIENTO 4	38	34	56	54	38	24	28	34	38	41	42	43	18	16	10	4	4	5
ALMACENAMIENTO 5	37	33	55	53	37	50	57	41	37	40	41	42	18	16	20	4	4	5
ALMACENAMIENTO 6	36	32	54	52	36	49	56	40	36	26	30	40	18	16	20	4	6	4
ALMACENAMIENTO 7	35	31	53	51	35	13	10	28	35	25	29	39	18	16	25	7	6	4
ALMACENAMIENTO 8	34	30	52	50	34	51	43	39	34	24	28	38	18	16	9	5	6	4
ALMACENAMIENTO 9	33	29	51	49	33	54	47	42	33	14	15	44	18	16	14	9	18	11
ALMACENAMIENTO 10	32	27	47	45	32	12	14	25	32	48	50	28	15	13	18	7	18	4
ALMACENAMIENTO 11	31	28	48	48	31	11	13	24	31	47	49	27	17	17	18	7	18	4
ALMACENAMIENTO 12	30	26	40	36	30	10	12	23	30	46	48	26	10	6	18	7	18	4
ALMACENAMIENTO 13	29	25	39	35	29	23	22	29	29	23	22	29	10	6	7	0	7	0
ALMACENAMIENTO 14	28	24	38	34	28	48	50	32	28	13	10	35	10	6	22	4	18	7
ALMACENAMIENTO 15	27	20	21	19	27	47	49	31	27	45	52	24	6	8	22	4	25	3
ALMACENAMIENTO 16	26	19	20	18	26	46	48	30	26	44	51	23	6	8	22	4	25	3
SERVICIOS 1	25	18	19	17	25	58	23	43	25	12	14	32	6	8	2	18	11	7
SERVICIOS 2	24	17	18	16	24	45	52	27	24	11	13	31	6	8	28	3	11	7
SERVICIOS 3	23	58	25	43	23	44	51	26	23	10	12	30	2	20	28	3	11	7
SERVICIOS 4	22	23	29	29	22	16	18	14	22	43	45	16	7	7	4	8	23	6
SERVICIOS 5	21	39	9	11	21	20	27	19	21	42	44	15	12	10	6	2	23	6
SERVICIOS 6	20	38	8	10	20	19	26	18	20	22	17	17	12	10	6	2	3	3
SERVICIOS 7	19	37	5	7	19	18	25	17	19	20	27	21	14	12	6	2	8	2
SERVICIOS 8	18	16	22	14	18	17	24	16	18	19	26	20	4	4	6	2	8	2
SERVICIOS 9	17	22	17	20	17	22	17	20	17	18	25	19	0	3	0	3	8	2
SERVICIOS 10	16	15	6	6	16	43	45	22	16	17	24	18	10	10	29	6	8	2
SERVICIOS 11	15	14	44	33	15	42	44	21	15	21	8	12	29	18	29	6	7	3
SERVICIOS 12	14	12	32	25	14	8	11	12	14	16	18	22	18	11	3	2	4	8
SERVICIOS 13	13	11	31	24	13	9	5	13	13	9	5	13	18	11	8	0	8	0
SERVICIOS 14	12	10	30	23	12	21	8	15	12	8	11	14	18	11	4	3	1	2
SERVICIOS 15	11	8	14	12	11	7	7	9	11	39	21	9	3	1	4	2	10	2
E1	10	13	35	28	10	6	6	8	10	38	20	8	25	18	4	2	10	2
E2	9	4	7	5	9	39	21	11	9	7	7	11	2	4	12	2	2	2
E3	8	21	12	15	8	38	20	10	8	6	6	10	4	7	12	2	2	2
E4	7	7	11	9	7	4	9	5	7	37	19	5	4	2	2	2	12	2
E5	6	6	10	8	6	15	16	6	6	15	16	6	4	2	10	0	10	0
E6	5	9	13	13	5	37	19	7	5	4	9	7	8	8	14	2	4	2
E7	4	3	3	4	4	2	2	3	4	3	4	3	1	0	2	1	0	1
E8	3	5	1	1	3	3	4	4	3	2	2	4	2	2	1	1	1	1
E9	2	2	4	3	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	0	1	0
E10	1	1	2	2	1	5	3	1	1	5	3	1	1	1	2	0	2	0
E11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

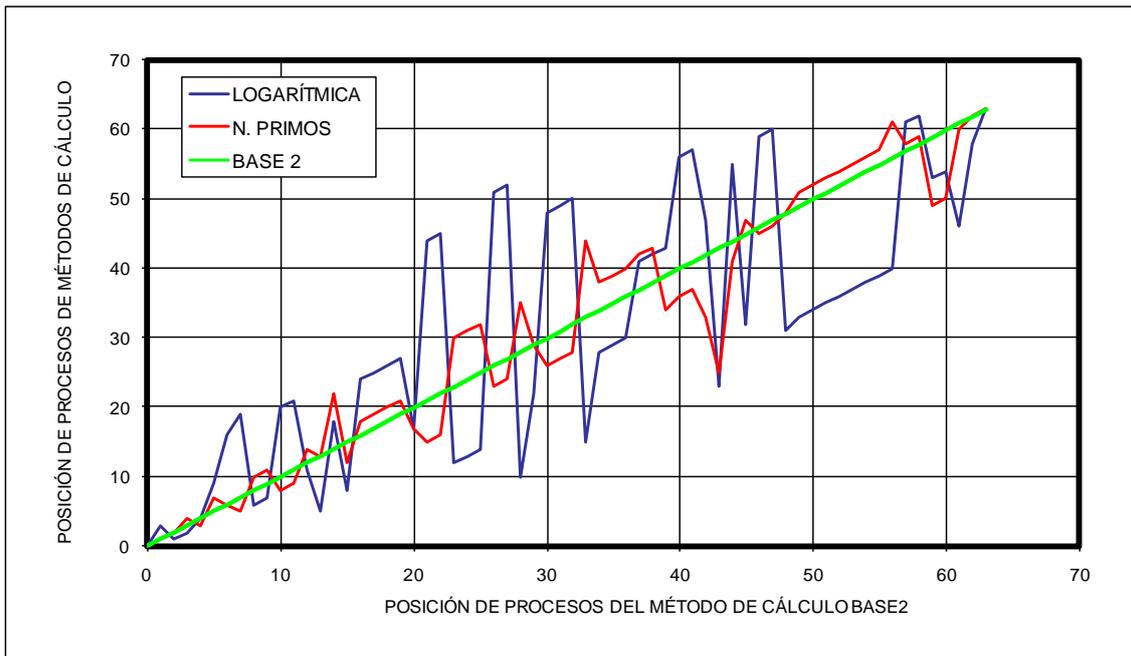
Tabla 7.9- Posiciones ordenadas de la criticidad de los procesos



Gráfica 7.1- Comparación de métodos de cálculo de la criticidad respecto la logarítmica



Gráfica 7.2- Comparación de métodos de cálculo de la criticidad respecto al Números Primos



Gráfica 7.3- Comparación de métodos de cálculo de la criticidad respecto al Base2

En las gráficas 7.1, 7.2 y 7.3 se observa como la recta con pendiente positiva de color verde, indica el método de referencia. Es de pendiente positiva ya que representa el orden en criticidad en que quedan los procesos de la planta industrial de estudio. Las demás curvas, indican la variación de posiciones del orden de criticidad de los diferentes métodos, respecto al de referencia.

A continuación, es el momento de calcular la criticidad de los niveles de sistemas *Tipo de Equipo* y *Equipo*. La tabla 7.10 y la 7.13, muestran la criticidad de tipos de equipo y de equipos respectivamente, de procesos de la industria de procesos.

CRITICIDAD DE TIPOS DE EQUIPO					
TIPO DE EQUIPO	ASPECTOS OPERATIVOS				CRITICIDAD
	Seguridad	Calidad	Producción	Mantenimiento	
Depósitos	1	2	2	2	16.777.216
Intercambio de Calor	1	3	2	2	2.097.152
Máquinas Rotativas	1	3	2	3	1.048.576
Instrumentación	2	2	2	3	524.288
Valvulería	2	2	4	3	32.768
Control	2	3	4	3	4.096
Equipos Electrónicos	2	3	4	4	2.048
Transporte	3	4	3	1	512

Tabla 7.10- Criticidad de tipos de equipos

Una vez se conoce los valores de criticidad de sistemas de diferentes niveles, es necesario establecer en cuantos grupos es necesario dividir la criticidad de cada nivel. Dicho de otro modo, se debe conocer la severidad de la criticidad en función de los resultados obtenidos.

En el caso de estudio que nos acontece, se divide la criticidad en tres grupos de severidad:

- a.  $N_{S_7,1}^A = N_{S_8,1}^A = N_{S_9,1}^A =$  Alta criticidad
- b.  $N_{S_7,2}^A = N_{S_8,2}^A = N_{S_9,2}^A =$  Media criticidad
- c.  $N_{S_7,3}^A = N_{S_8,3}^A = N_{S_9,3}^A =$  Baja criticidad

Por tanto, la cantidad de grupos de severidad de criticidad por cada nivel de sistemas son:

$$C_{N_{S_7}^A} = C_{N_{S_8}^A} = C_{N_{S_9}^A} = 3$$

Los valores de criticidad para cada grupo de severidad y para cada nivel del caso de estudio, se muestra en la tabla 7.11. Dicha tabla, corresponde a la valoración utilizando el método de cálculo de criticidad *Base2*.

NIVELES	Baja Criticidad		Media Criticidad		Alta Criticidad
	$V_{N_{S_7,1}^A}^I = 0$	$V_{N_{S_7,1}^S} = 499.999$	$V_{N_{S_7,2}^I} = 2.499.999$	$V_{N_{S_7,2}^A} = 5 \cdot 10^5$	$V_{N_{S_7,3}^A} \geq 2,5 \cdot 10^6$
Procesos	$V_{N_{S_8,1}^I} = 0$	$V_{N_{S_8,1}^S} = 49.999$	$V_{N_{S_8,2}^I} = 999.999$	$V_{N_{S_8,2}^A} = 5 \cdot 10^4$	$V_{N_{S_8,3}^A} \geq 10^6$
Tipo de Equipo	$V_{N_{S_9,1}^I} = 0$	$V_{N_{S_9,1}^S} = 49.999$	$V_{N_{S_9,2}^I} = 999.999$	$V_{N_{S_9,2}^A} = 5 \cdot 10^4$	$V_{N_{S_9,3}^A} \geq 10^6$

Tabla 7.11- Rangos de grupos de severidad de criticidad para el método de cálculo *Base2*

Una forma habitual de expresar más visualmente la severidad de la criticidad, es otorgando un color a cada grupo de severidad. Es por ello, que la distribución de colores es como muestra en la tabla 7.12.

SEVERIDAD DE CRITICIDAD	COLOR REPRESENTATIVO
Alta Criticidad	ROJO
Media Criticidad	AMARILLO
Baja Criticidad	VERDE

Tabla 7.12- Representación en colores de los grupos de severidad de criticidad

En el presente caso de estudio, se divide en tres grupos de severidad de criticidad; pero, se puede dividir en la cantidad de grupos que se crea oportuno. Es aconsejable, que se divida en un número de grupos no superior a 10 para que sea cómoda su identificación.

La tabla 7.13, muestra la criticidad de los equipos del proceso MP1, calculada con el método Base2. Se puede observar como para cada equipo, se le asigna un nivel de cada aspecto operativo. Cada uno de los niveles de cada unos de los aspectos operativos, corresponde a un valor numérico del método Base2. Estos cuatro valores numéricos de cada aspecto operativo, se multiplican entre si y surge la criticidad de cada equipo.

No importa que surjan valores de criticidad con valores numéricos muy dispersos, desde pequeños hasta muy grande; puesto que posteriormente se establecen sus rangos de criticidad.

La distribución de los diferentes sistemas de los tres niveles del caso de estudio en grupos de severidad de criticidad; así como, su representación en colores, de define en la tabla 7.14.

CRITICIDAD DE EQUIPOS					
EQUIPO	ASPECTOS OPERATIVOS				CRITICIDAD
	Seguridad	Calidad	Producción	Mantenimiento	
Tuberías 1	1	1	2	2	134.217.728
Reactor 1	1	1	2	2	134.217.728
Plc 1	1	1	2	3	67.108.864
Termómetro 1	1	1	2	3	67.108.864
Agitador 1	1	2	2	3	8.388.608
Controlador 1	1	2	2	3	8.388.608
Intercambiador 1	1	3	2	2	2.097.152
Caldera 1	1	3	2	2	2.097.152
Nivel 1	1	3	2	2	2.097.152
Nivel 2	1	3	2	2	2.097.152
Manómetro 1	1	3	2	2	2.097.152
Tuberías 2	1	3	2	2	2.097.152
Manómetro 2	1	3	2	3	1.048.576
Reactor 2	1	2	3	4	1.048.576
Intercambiador 2	3	1	2	2	524.288
Compresor 1	1	4	2	1	524.288
Columna destilación 1	1	3	3	3	262.144
Tanque 1	1	4	2	2	262.144
Reactor 3	1	4	2	2	262.144
Controlador 2	1	4	2	3	131.072
Manómetro 3	1	4	2	3	131.072
Tanque 2	1	4	2	3	131.072
Tuberías 3	1	4	2	3	131.072
Tuberías 4	1	4	2	3	131.072
Intercambiador 3	2	3	2	3	65.536
Bomba 1	3	2	2	3	32.768
Intercambiador 4	2	4	3	1	8.192
Compresor 2	3	3	2	2	8.192
Compresor 3	3	3	2	2	8.192
Bomba 2	3	3	2	3	4.096
Registrador 1	4	1	3	3	4.096
Columna destilación 2	3	3	3	2	2.048
Termómetro 2	4	2	2	3	2.048
Agitador 2	3	3	3	3	1.024
Nivel 3	3	3	3	3	1.024
Bomba 3	4	2	2	4	1.024
Reactor 4	2	4	3	4	1.024
Nivel 4	3	3	3	4	512
Bomba 4	4	2	3	3	512
Manómetro 4	3	3	3	4	512
Termómetro 3	3	3	3	4	512
Reactor 5	3	3	3	4	512
Reactor 6	3	4	2	4	256
Bomba 5	3	4	3	3	128
Polipasto 1	3	4	3	3	128
Intercambiador 5	4	3	3	4	32
Bomba 6	4	4	2	4	16
Termómetro 4	4	3	4	4	8
Registrador 2	4	4	3	3	8
Columna destilación 3	4	4	4	4	1

Tabla 7.13- Criticidad de equipos

SEVERIDAD DE SISTEMAS POR NIVELES		
PROCESOS	TIPO DE EQUIPO	EQUIPO
MP 1	Depósitos	Tuberías 1
MP 2	Intercambio de Calor	Reactor 1
A1	Máquinas Rotativas	Plc 1
A2	Instrumentación	Termómetro 1
A3	Valvulería	Agitador 1
A4	Control	Controlador 1
A5	Equipos Electrónicos	Intercambiador 1
B1	Transporte	Caldera 1
B2		Nivel 1
B3		Nivel 2
B4		Manómetro 1
C1		Tuberías 2
C2		Manómetro 2
C3		Reactor 2
C4		Intercambiador 2
C5		Compresor 1
B5		Columna destilación 1
B6		Tanque 1
D1		Reactor 3
D2		Controlador 2
D3		Manómetro 3
D4		Tanque 2
ALMACENAMIENTO 1		Tuberías 3
ALMACENAMIENTO 2		Tuberías 4
ALMACENAMIENTO 3		Intercambiador 3
ALMACENAMIENTO 4		Bomba 1
ALMACENAMIENTO 5		Intercambiador 4
ALMACENAMIENTO 6		Compresor 2
ALMACENAMIENTO 7		Compresor 3
ALMACENAMIENTO 8		Bomba 2
ALMACENAMIENTO 9		Registrador 1
ALMACENAMIENTO 10		Columna destilación 2
ALMACENAMIENTO 11		Termómetro 2
ALMACENAMIENTO 12		Agitador 2
ALMACENAMIENTO 13		Nivel 3
ALMACENAMIENTO 14		Bomba 3
ALMACENAMIENTO 15		Reactor 4
ALMACENAMIENTO 16		Nivel 4
SERVICIOS 1		Bomba 4
SERVICIOS 2		Manómetro 4
SERVICIOS 3		Termómetro 3
SERVICIOS 4		Reactor 5
SERVICIOS 5		Reactor 6
SERVICIOS 6		Bomba 5
SERVICIOS 7		Polipasto 1
SERVICIOS 8		Intercambiador 5
SERVICIOS 9		Bomba 6
SERVICIOS 10		Termómetro 4
SERVICIOS 11		Registrador 2
SERVICIOS 12		Columna destilación 3
SERVICIOS 13		
SERVICIOS 14		
SERVICIOS 15		
E1		
E2		
E3		
E4		
E5		
E6		
E7		
E8		
E9		
E10		
E11		

Tabla 7.14- Distribución de sistemas de niveles por grupos de severidad expresado con colores

## **7.5 CÁLCULO DE CRITICIDADES SEGÚN CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPO**

### **7.5.1 INTRODUCCIÓN**

Este método consiste en definir una cantidad de características que tienen los equipos y ponderar su criticidad. Estas características son de todo tipo desde geométricas, hasta comerciales pasando por productivas.

Cada uno de estos tipos de características se desglosa en una serie de características o variables, propias de los equipos de estudio.

El objetivo final es calcular la criticidad de una cantidad de equipos y ver cuál es el orden de criticidad de los mismos.

De forma general los pasos a seguir para calcular las criticidades de equipos son:

- 1- Definir los tipos de características con los cuales trabajan los activos de los centros de trabajo de estudio.
- 2- Analizar para cada tipo de característica las variables que se interaccionan con dichos activos.
- 3- Ponderar de cada variable en relación a todas las variables de todos los tipos de características del estudio, para que no haya desviaciones importantes.
- 4- Escoger una cantidad de activos críticos y definir que variables participan.
- 5- Sumar el valor de la ponderación de las variables y comprobar el valor final de criticidad obtenido.
- 6- Realizar un estudio comparativo y cualitativo del resultado obtenido; con personal con gran experiencia en la compañía. Se sugiere que participe personal de varios departamentos (mantenimiento, ingeniería, producción, calidad, seguridad, comercial, finanzas e incluso si fuese necesario recursos humanos); así se consigue una comparación más objetiva.
- 7- Retóquese el valor de la ponderación de variables que se consideren necesarios.

- 8- Vuelva a realizar el cálculo con los mismos equipos.
- 9- Repítase el ciclo las veces necesarias hasta que se consiga unos resultados satisfactorios.
- 10- Con todo ello se conseguirá tener parametrizado el cálculo de criticidades para el tipo de industria y centro de trabajo de estudio. Por ello, se puede conocer la criticidad de cualquier otro equipo instalado o la de un nuevo equipo. Muy útil para conocer el nivel de recursos tecnológicos y humanos en mantenimiento asignado a dicho equipo.

### **7.5.2 DESARROLLO Y PROCESO DE CÁLCULO**

El desarrollo y proceso de cálculo, se basa en la asignación de un valor de criticidad a variables de tipos de características de sistemas de niveles de sistemas, los cuales se quiere conocer su criticidad total. Para ello, se define tipos de características de cada nivel de sistemas con la serie 7.21. Las variables englobadas en cada una de los tipos de características, se definen con la serie 7.22.

Existirán tantos tipos de características y tantas variables de cada tipo de características, como se requiere para conseguir mayor o menor precisión en el cálculo de criticidad. Cuantas más variables de tipos de características se definan, mayor será la fiabilidad y precisión en el resultado de la criticidad de sistemas; pero, mayor será el esfuerzo y coste necesario para llegar a dicho resultado. De ahí, que se defina en las series 7.25 y 7.26, rangos de cantidad de variables por tipos de características y con ello su correspondiente fiabilidad del resultado de criticidad de sistemas.

$$\begin{aligned}
 & \left\{ T_{S_1,1}^C, T_{S_1,2}^C, \dots, T_{S_1,k_1}^C, \dots, T_{S_1,C_{T_{S_1}^C}}^C \right\} \\
 & \left\{ T_{S_2,1}^C, T_{S_2,2}^C, \dots, T_{S_2,k_2}^C, \dots, T_{S_2,C_{T_{S_2}^C}}^C \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ T_{S_i,1}^C, T_{S_i,2}^C, \dots, T_{S_i,k_i}^C, \dots, T_{S_i,C_{T_{S_i}^C}}^C \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ T_{S_n,1}^C, T_{S_n,2}^C, \dots, T_{S_n,k_n}^C, \dots, T_{S_n,C_{T_{S_n}^C}}^C \right\} \\
 & \left\{ \left( \mathbb{P}_{T_{S_1,1}^C, l_{S_1,1}} \right), \left( \mathbb{P}_{T_{S_1,2}^C, l_{S_1,2}} \right), \dots, \left( \mathbb{P}_{T_{S_1,k_1}^C, l_{S_1,k_1}} \right), \dots, \left( D_{T_{S_1,C_{T_{S_1}^C}}^C} \right)_{C_{S_1,C_{T_{S_1}^C}}} \right\} \\
 & \left\{ \left( \mathbb{P}_{T_{S_2,1}^C, l_{S_2,1}} \right), \left( \mathbb{P}_{T_{S_2,2}^C, l_{S_2,2}} \right), \dots, \left( \mathbb{P}_{T_{S_2,k_2}^C, l_{S_2,k_2}} \right), \dots, \left( D_{T_{S_2,C_{T_{S_2}^C}}^C} \right)_{C_{S_2,C_{T_{S_2}^C}}} \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ \left( \mathbb{P}_{T_{S_i,1}^C, l_{S_i,1}} \right), \left( \mathbb{P}_{T_{S_i,2}^C, l_{S_i,2}} \right), \dots, \left( \mathbb{P}_{T_{S_i,k_i}^C, l_{S_i,k_i}} \right), \dots, \left( D_{T_{S_i,C_{T_{S_i}^C}}^C} \right)_{C_{S_i,C_{T_{S_i}^C}}} \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ \left( \mathbb{P}_{T_{S_n,1}^C, l_{S_n,1}} \right), \left( \mathbb{P}_{T_{S_n,2}^C, l_{S_n,2}} \right), \dots, \left( \mathbb{P}_{T_{S_n,k_n}^C, l_{S_n,k_n}} \right), \dots, \left( D_{T_{S_n,C_{T_{S_n}^C}}^C} \right)_{C_{S_n,C_{T_{S_n}^C}}} \right\}
 \end{aligned} \tag{7.22}$$

Siendo:

- $T_{S_i,k_i}^C$  : Tipos de características de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $\left( \mathbb{P}_{T_{S_i,k_i}^C, l_{S_i,k_i}} \right)$  : Variables de criticidad de cada tipo de característica por cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $k_i$  : Número del tipo de característica de sistemas del nivel  $i$ .
- $l_{S_i,k_i}$  : Número de variable de criticidad de cada tipo de características, por cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

- $C_{T_{S_i}^c}$  : Cantidad de tipos de características de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{S_i C_{T_{S_i}^c}}$  : Cantidad de variables de criticidad de cada tipo de característica, por cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Para conocer la cantidad de tipos de características y tipos de variables de criticidad, por cada tipo de característica de todos los niveles de los sistemas de forma genérica, para todos los sistemas, se debe recurrir a las ecuaciones 7.23 y 7.24.

$$C_{T^c} = \sum_{i=1}^n C_{T_{S_i}^c} \quad (7.23)$$

$$C_{SC_{T^c}} = \sum_{i=1}^n \sum_{k_i=1}^{C_{T_{S_i}^c}} \left( C_{S_i C_{T_{S_i}^c}} \right)_{k_i} \quad (7.24)$$

Siendo:

- $C_{T^c}$  : Cantidad de tipos de características de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{SC_{T^c}}$  : Cantidad de variables de criticidad de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $S_i$  : Niveles de los sistemas susceptibles de aplicar RCM.

$$\left\{ \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_1^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_1^c}}, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_2^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_2^c}}, \dots, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_{i_1}^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_{i_1}^c}}, \dots, \left( E^I \right)_{\tau_{S_1^c}^c T_{S_1^c}^c} \right\}_{C_{S_1^c} M_{S_1^c}^c}$$

$$\left\{ \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_2^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_2^c}}, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_2^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_2^c}}, \dots, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_{2k_2}^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_{2k_2}^c}}, \dots, \left( E^I \right)_{\tau_{S_2^c}^c T_{S_2^c}^c} \right\}_{C_{S_2^c} M_{S_2^c}^c}$$

...

$$\left\{ \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_i^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_i^c}}, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_i^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_i^c}}, \dots, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_{i_{k_i}}^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_{i_{k_i}}^c}}, \dots, \left( E^I \right)_{\tau_{S_i^c}^c T_{S_i^c}^c} \right\}_{C_{S_i^c} M_{S_i^c}^c}$$

...

$$\left\{ \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_n^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_n^c}}, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_n^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_n^c}}, \dots, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^I \\ T_{S_{n^{k_n}}^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_{n^{k_n}}^c}}, \dots, \left( E^I \right)_{\tau_{S_n^c}^c T_{S_n^c}^c} \right\}_{C_{S_n^c} M_{S_n^c}^c} \quad (7.25)$$

$$\left\{ \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_1^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_1^c}}, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_2^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_2^c}}, \dots, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_{i_1}^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_{i_1}^c}}, \dots, \left( E^S \right)_{\tau_{S_1^c}^c T_{S_1^c}^c} \right\}_{C_{S_1^c} M_{S_1^c}^c}$$

$$\left\{ \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_2^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_2^c}}, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_2^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_2^c}}, \dots, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_{2k_2}^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_{2k_2}^c}}, \dots, \left( E^S \right)_{\tau_{S_2^c}^c T_{S_2^c}^c} \right\}_{C_{S_2^c} M_{S_2^c}^c}$$

...

$$\left\{ \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_i^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_i^c}}, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_i^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_i^c}}, \dots, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_{i_{k_i}}^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_{i_{k_i}}^c}}, \dots, \left( E^S \right)_{\tau_{S_i^c}^c T_{S_i^c}^c} \right\}_{C_{S_i^c} M_{S_i^c}^c}$$

...

$$\left\{ \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_n^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_n^c}}, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_n^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_n^c}}, \dots, \left( \begin{array}{c} \mathbb{E}^S \\ T_{S_{n^{k_n}}^c}^c \end{array} \right)_{m_{S_{n^{k_n}}^c}}, \dots, \left( E^S \right)_{\tau_{S_n^c}^c T_{S_n^c}^c} \right\}_{C_{S_n^c} M_{S_n^c}^c} \quad (7.26)$$

Siendo:

- $\left( F_{T_{S_i}^C}^I \right)_{m_{S_i k_i}}$  : Rangos inferiores de tipos de características de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $\left( F_{T_{S_i}^C}^S \right)_{m_{S_i k_i}}$  : Rangos superiores de tipos de características de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $m_{S_i k_i}$  : Número del rango inferior y rango superior del tipo de característica de sistemas del nivel  $i$ .
- $C_{S_i C_{M_{S_i}^c}}$  : Cantidad de rangos inferiores y superiores de tipos de características, de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Para conocer la cantidad de rangos de criticidad de variables de criticidad, por cada tipo de característica de todos los niveles de los sistemas de forma genérica, para todos los sistemas se debe recurrir a la ecuación 7.27. Dichas cantidad de rangos, definirá la cantidad de grados de fiabilidad de cálculo de la criticidad.

$$F_C^R = \sum_{i=1}^n \sum_{k_i=1}^{C_{T_{S_i}^c}} \left( C_{S_i C_{M_{S_i}^c}} \right)_{k_i} \quad (7.27)$$

Siendo:

- $F_C^R$  : Cantidad de tipos de fiabilidad por tipos de características, para todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Sea:

- $V \left( D_{T_{S_i}^C} \right)_{l_{S_i k_i}}$  : Valor de criticidad de cada variable, de tipos de variables de niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

El valor de criticidad de un sistema de un nivel concreto, viene expresado mediante la ecuación 7.28.

$$R_{S_{ij}}^T = \sum_{k_i=1}^{C_{T_{S_i}}^c} \sum_{l_{S_{jk_i}}=1}^{C_{S_i} C_{T_{S_i}}^c} V \left( D_{T_{S_{jk_i}}}^c \right)_{l_{S_{jk_i}}} \cdot P \left( D_{T_{S_{jk_i}}}^c \right)_{l_{S_{jk_i}}} \quad (7.28)$$

Siendo:

- $R_{S_{ij}}^T$  : Criticidad de un sistema de un nivel concreto, para todos los tipos de características.
- $P \left( D_{T_{S_{jk_i}}}^c \right)_{l_{S_{jk_i}}}$  : 1 ó 0, según corresponda o no la variable de criticidad de un tipo de característica para un nivel y sistema dado  $S_{ij}$ .

Una vez se ha definido la criticidad, es el momento de establecer grupos de severidad de criticidad, por los cuales se considera que un sistema es más o menos crítico que otro. Para ello, se define en la serie 7.29 niveles de criticidad para niveles de sistemas.

$$\left\{ N_{S_1 1}^T, N_{S_1 2}^T, \dots, N_{S_1 p_1}^T, \dots, N_{S_1 C_{N_{S_1}^T}}^T \right\}$$

$$\left\{ N_{S_2 1}^T, N_{S_2 2}^T, \dots, N_{S_2 p_2}^T, \dots, N_{S_2 C_{N_{S_2}^T}}^T \right\}$$

...

$$\left\{ N_{S_i 1}^T, N_{S_i 2}^T, \dots, N_{S_i p_i}^T, \dots, N_{S_i C_{N_{S_i}^T}}^T \right\}$$

...

$$\left\{ N_{S_n 1}^T, N_{S_n 2}^T, \dots, N_{S_n p_n}^T, \dots, N_{S_n C_{N_{S_n}^T}}^T \right\}$$

(7.29)

Siendo:

- $N_{S_i p_i}^T$  : Grupo de severidad de criticidad.
- $p_i$  : Número del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{N_{S_i}^T}$  : Cantidad de grupos de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Sea:

- $V_{N_{S_i}^T}^I$  : Valor inferior del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $V_{N_{S_i}^T}^S$  : Valor superior del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Se cumple el sistema de ecuaciones 7.30.

$$\left\{ V_{N_{S_1}^T}^I = 0; \quad V_{N_{S_2}^T}^I = V_{N_{S_1}^T}^S + 1; \quad V_{N_{S_3}^T}^I = V_{N_{S_2}^T}^S + 1; \quad \dots; \quad V_{N_{S_i}^T}^I = V_{N_{S_{i-1}}^T}^S + 1 \right\} \quad (7.30)$$

### 7.5.3 CASO DE ESTUDIO

El presente caso de estudio muestra una organización de cálculo de criticidades, por el método de características de los equipos. Los tipos de características se pueden observar en la tabla 7.15. Los tipos de fiabilidad del cálculo de la criticidad son 3, y la cantidad de variables por tipo de característica se representa en la tabla 7.16.

#### **TIPOS DE CARACTERÍSTICAS**

1	Tipo de Equipo
2	Tipo de Proceso
3	Producto de Trabajo
4	Variables Técnicas
5	Variables Funcionales
6	Variables Legales
7	Variables Económicas
8	Variables de Intercambiabilidad

Tabla 7.15- Tipos de Características

TIPOS DE CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD DE VARIABLES		
	FIABILIDAD 1	FIABILIDAD 2	FIABILIDAD 3
Tipo de Equipo	5	60	490
Tipo de Proceso	5	20	150
Producto de Trabajo	3	15	40
VARIABLES TÉCNICAS	10	85	1.200
VARIABLES FUNCIONALES	3	12	44
VARIABLES LEGALES	3	25	250
VARIABLES ECONÓMICAS	4	50	300
VARIABLES DE INTERCAMBIABILIDAD	2	15	100
Total	35	282	2.574

Tabla 7.16- Cantidad de variables por tipos de fiabilidad

Como se observa en la tabla 7.16, para cada tipo de fiabilidad de la criticidad tiene una cantidad diferente de variables de cada tipo de características. Con ello, se consigue mayor precisión utilizando el tipo de fiabilidad 3 que el de fiabilidad 2 y el de fiabilidad 1; pero, por contrapartida, se necesita más recursos para utilizarlo.

### 7.5.3.1 FIABILIDAD 1

Se muestran en las tablas 7.17 a 7.24 las variables de cada tipo de característica y su ponderación en criticidad, del tipo de fiabilidad 1.

TIPOS DE EQUIPO		
Nº ORDEN	VARIABLES	CRITICIDAD
1	Equipos Rotativos	80
2	Intercambio de Calor	110
3	Depósitos	75
4	Valvulería	45
5	Equipos Eléctricos	60

Tabla 7.17- Tipos de equipos de fiabilidad 1

TIPOS DE PROCESO		
Nº ORDEN	VARIABLES	CRITICIDAD
1	Producción	210
2	Logística	280
3	Calidad	190
4	Servicios	325
5	Auxiliares	170

Tabla 7.18- Tipos de procesos de fiabilidad 1

<b>PRODUCTO DE TRABAJO</b>		
<b>Nº ORDEN</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>CRITICIDAD</b>
1	Materia Prima	400
2	Producto Acabado	420
3	Productos de Servicios	450

Tabla 7.19- Producto de trabajo de fiabilidad 1

<b>VARIABLES TÉCNICAS</b>		
<b>Nº ORDEN</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>CRITICIDAD</b>
1	Geometría	38
2	Transmisión	18
3	Estanqueidad	50
4	Dinámica	15
5	Estática	100
6	Materiales	40
7	Eléctricas	100
8	Requerimiento Productivo	140
9	Seguridad	150
10	Confiabilidad	210

Tabla 7.20- Variables técnicas de fiabilidad 1

<b>TIPOS DE PRODUCCIÓN</b>		
<b>Nº ORDEN</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>CRITICIDAD</b>
1	Continuo	150
2	Discontinuo	110
3	Bajo pedido	90

Tabla 7.21- Tipos de producción de fiabilidad 1

<b>VARIABLES LEGALES</b>		
<b>Nº ORDEN</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>CRITICIDAD</b>
1	Reglamentación Industrial	120
2	Medio Ambiente	180
3	Seguridad	160

Tabla 7.22- Variables legales de fiabilidad 1

<b>VARIABLES ECONÓMICAS</b>		
<b>Nº ORDEN</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>CRITICIDAD</b>
1	Coste	235
2	Valor activo	135
3	Stock disponible	230
4	Precio producto	310

Tabla 7.23- Variables económicas de fiabilidad 1

<b>VARIABLES DE INTERCAMBIABILIDAD</b>		
<b>Nº ORDEN</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>CRITICIDAD</b>
1	Reparable	45
2	Existencia de recambio	75

Tabla 7.24- Variables de intercambiabilidad de fiabilidad 1

### 7.5.3.2 FIABILIDAD 2

Se muestran en las tablas 7.25 a 7.32 las variables de cada tipo de característica y su ponderación en criticidad, del tipo de fiabilidad 2.

TIPOS DE EQUIPO					
Nº ORDEN	VARIABLES	CRITICIDAD	Nº ORDEN	VARIABLES	CRITICIDAD
1	Soplante	25	31	Climatizador	35
2	Ventilador	55	32	Columna de destilación	135
3	Agitador	120	33	Scrubber	110
4	Mezclador	80	34	Columna Intercambio	45
5	Bomba rotodinámica	100	35	Horno	170
6	Bomba alternativa	110	36	Chimenea	90
7	Bomba de vacío	125	37	Tanque	240
8	Compresor	100	38	Reactor	140
9	Reductor	90	39	Recipiente	55
10	Turbina	150	40	Tolva	17
11	Motor eléctrico	85	41	Demister	75
12	Motor de combustión	95	42	Válvula de respiración	20
13	Cinta transportadora	115	43	Disco de ruptura	30
14	Bis-sin-fin	71	44	Válvula de alivio	50
15	Husillo	30	45	Válvula autorreguladora	25
16	Polipasto	45	46	Válvula de seguridad	190
17	Laminadora	160	47	Válvula manual	25
18	Trefiladora	155	48	Válvula rotativa	26
19	Máquinas de artes gráficas	140	49	Mirilla	74
20	Intercambiador de calor de tubos	120	50	Mirilla con luz	70
21	Intercambiador de calor de placas	130	51	Apagallamas	62
22	Intercambiador de calor de aletas	135	52	Cuadro eléctrico	115
23	Condensador	60	53	Generador	240
24	Reboiler	25	54	Transformador	220
25	Torre de refrigeración	150	55	Alternador	190
26	Estufa de vapor	35	56	Diferencial	205
27	Estufa de aire	30	57	Magnetotérmico	180
28	Caldera de aceite	150	58	Motor	150
29	Caldera de vapor	180	59	Batería	130
30	Frigorífica	150	60	Lámpara	60

Tabla 7.25- Tipos de equipos de fiabilidad 2

TIPOS DE PROCESO		
Nº ORDEN	VARIABLES	CRITICIDAD
1	Reacción	280
2	Transformación	250
3	Destilación	220
4	Fusión	310
5	Mezcla	190
6	Recepción materia prima	150
7	Almacenaje producto semielaborado	240
8	Almacenaje producto elaborado	195
9	Empaquetado	140
10	Etiquetado	180
11	Calidad de producto	260
12	Calidad de proceso	200
13	Calidad humana	230
14	Agua	250
15	Gas	280
16	Electricidad	265
17	Comunicación	350
18	Oficinas	125
19	Laboratorio	210
20	Mantenimiento	190

Tabla 7.26- Tipos de procesos de fiabilidad 2

---

<b>PRODUCTO DE TRABAJO</b>		
<b>Nº ORDEN</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>CRITICIDAD</b>
1	Agua	220
2	Mineral	165
3	Líquido	140
4	Grasa	110
5	Sólido	150
6	Plancha	120
7	Gas	390
8	Pieza	180
9	Mecanismo	190
10	Equipo	240
11	Nitrógeno	400
12	Hidrógeno	500
13	Amoníaco	500
14	Aceite	380
15	Electricidad	350

Tabla 7.27- Producto de trabajo de fiabilidad 2

VARIABLES TÉCNICAS					
Nº ORDEN	VARIABLES	CRITICIDAD	Nº ORDEN	VARIABLES	CRITICIDAD
1	Longitud >10 m	70	44	Presión de diseño 1	100
2	Longitud 1 a 10 m	40	45	Presión de diseño 2	55
3	Longitud < 1 m	25	46	Presión de diseño 3	20
4	Diámetro >1 m	90	47	Temperatura de trabajo 1	295
5	Diámetro 250 a 1 m	60	48	Temperatura de trabajo 2	240
6	Diámetro 50 a 250 mm	35	49	Temperatura de trabajo 3	130
7	Diámetro < 50 mm	10	50	Temperatura de trabajo 4	90
8	Altura > 3 m	60	51	PxV 1	90
9	Altura 500 a 3 m	35	52	PxV 2	40
10	Altura < 500 mm	15	53	DN 1	25
11	Volumen 1	110	54	DN 2	15
12	Volumen 2	80	55	DN 3	8
13	Volumen 3	50	56	DN 4	6
14	Peso 1	33	57	PN 1	30
15	Peso 2	20	58	PN 2	16
16	Peso 3	12	59	PN 3	9
17	Tipo transmisión 1	25	60	PN 4	7
18	Tipo transmisión 2	20	61	Material 1	90
19	Tipo transmisión 3	10	62	Material 2	65
20	Tipo transmisión 4	7	63	Material 3	40
21	Tipo cierre 1	130	64	Material 4	25
22	Tipo cierre 2	50	65	Material 5	15
23	Tipo cierre 3	30	66	Intensidad 1	120
24	Material junta 1	210	67	Intensidad 2	90
25	Material junta 2	155	68	Intensidad 3	60
26	Material junta 3	110	69	Voltaje 1	150
27	Material junta 4	70	70	Voltaje 2	100
28	Material junta 5	30	71	Voltaje 3	40
29	Potencia 1	180	72	Caudal 1	140
30	Potencia 2	120	73	Caudal 2	90
31	Potencia 3	55	74	Caudal 3	60
32	R.P.M. 1	10	75	Caudal 4	35
33	R.P.M. 2	5	76	NPSH 1	140
34	Tipo reductor 1	30	77	NPSH 2	100
35	Tipo reductor 2	15	78	NPSH 3	70
36	Rendimiento 1	110	79	Producción horaria	180
37	Rendimiento 2	75	80	Disponibilidad/anual	310
38	Presión de trabajo 1	230	81	Productividad	280
39	Presión de trabajo 2	170	82	Protección IP 1	140
40	Presión de trabajo 3	120	83	Protección IP 2	95
41	Presión de prueba 1	150	84	Fiabilidad	250
42	Presión de prueba 2	90	85	Mantenibilidad	205
43	Presión de prueba 3	40			

Tabla 7.28- Variables técnicas de fiabilidad 2

<b>TIPOS DE PRODUCCIÓN</b>		
<b>Nº ORDEN</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>CRITICIDAD</b>
1	Continuo 365 días / año	350
2	Continuo 300 a 364 días / año	200
3	Continuo 24 horas/día	180
4	Continuo 16 horas/día	140
5	Continuo 8 horas/día	80
6	Discontinuo > 75 % ocupación	290
7	Discontinuo 50 a 75 % ocupación	220
8	Discontinuo 25 a 50 % ocupación	140
9	Discontinuo < 25 % ocupación	50
10	Pedidos semanales	120
11	Pedidos mensuales	80
12	Pedidos anuales	40

Tabla 7.29- Tipos de producción de fiabilidad 2

<b>VARIABLES LEGALES</b>		
<b>Nº ORDEN</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>CRITICIDAD</b>
1	Aparatos a presión (1)	300
2	Aparatos a presión (2)	220
3	Almacenaje productos químicos (1)	450
4	Almacenaje productos químicos (2)	380
5	Almacenaje productos químicos (3)	300
6	Reglamentación petrolera (1)	450
7	Reglamentación petrolera (2)	430
8	Reglamentación petrolera (3)	400
9	Reglamentación nuclear (1)	800
10	Reglamentación nuclear (2)	600
11	Reglamentación nuclear (3)	500
12	REBT (1)	220
13	REBT (2)	180
14	REBT (3)	120
15	RD-1215	64
16	ISO 9000:2000 (1)	210
17	ISO 9000:2000 (2)	180
18	ISO 14000 (1)	240
19	ISO 14000 (2)	200
20	ISO 18000 (1)	250
21	ISO 18000 (2)	190
22	RD 786 / 2001	50
23	RD 2200 / 1995	50
24	CE	80
25	Ex	150

Tabla 7.30- Variables legales de fiabilidad 2

VARIABLES ECONÓMICAS					
Nº ORDEN	VARIABLES	CRITICIDAD	Nº ORDEN	VARIABLES	CRITICIDAD
1	Valor producto 1	340	26	Precio equipo 9	15
2	Valor producto 2	310	27	Precio equipo 10	4
3	Valor producto 3	240	28	Coste Mantenimiento 1	230
4	Valor producto 4	220	29	Coste Mantenimiento 2	160
5	Valor producto 5	180	30	Coste Mantenimiento 3	120
6	Valor producto 6	100	31	Coste Mantenimiento 4	110
7	Valor producto 7	80	32	Coste Mantenimiento 5	80
8	Valor producto 8	60	33	Coste Mantenimiento 6	35
9	Valor producto 9	20	34	Coste Mantenimiento 7	15
10	Stock disponible 1	290	35	Coste Mantenimiento 8	2
11	Stock disponible 2	230	36	Coste insatisfacción cliente 1	440
12	Stock disponible 3	140	37	Coste insatisfacción cliente 2	380
13	Stock disponible 4	100	38	Coste insatisfacción cliente 3	320
14	Stock disponible 5	80	39	Coste insatisfacción cliente 4	280
15	Stock disponible 6	60	40	Coste insatisfacción cliente 5	260
16	Stock disponible 7	40	41	Coste insatisfacción cliente 6	220
17	Stock disponible 8	10	42	Coste insatisfacción cliente 7	180
18	Precio equipo 1	250	43	Coste insatisfacción cliente 8	150
19	Precio equipo 2	190	44	Coste insatisfacción cliente 9	120
20	Precio equipo 3	125	45	Coste insatisfacción cliente 10	100
21	Precio equipo 4	110	46	Plazo de entrega 1	90
22	Precio equipo 5	100	47	Plazo de entrega 2	70
23	Precio equipo 6	90	48	Plazo de entrega 3	50
24	Precio equipo 7	70	49	Plazo de entrega 4	20
25	Precio equipo 8	40	50	Plazo de entrega 5	25

Tabla 7.31- Variables económicas de fiabilidad 2

VARIABLES DE INTERCAMBIABILIDAD		
Nº ORDEN	VARIABLES	CRITICIDAD
1	Hay recambio	2
2	Poco recambios	90
3	No hay recambio	150
4	Intercambiable	1
5	Baja intercambiabilidad	55
6	No Intercambiable	80
7	Reparable	15
8	Poco reparable	30
9	No reparable	40
10	Testeable	18
11	Poco testeable	40
12	No testeable	55
13	Detectable	10
14	Poca detectabilidad	25
15	No detectable	35

Tabla 7.32- Variables de intercambiabilidad de fiabilidad 2

### 7.5.3.3 FIABILIDAD 3

Dado la gran cantidad de variables de los tipos de características del tipo de fiabilidad 3, no se muestra su desarrollo en tablas. Una vez mostrado el desarrollo de los tipos

de fiabilidad 1 y 2; se indica, que el desarrollo del tipo de fiabilidad 3 resulta de definir más cantidad de intervalos de las variables mostradas e en el tipo de fiabilidad 2.

#### 7.5.3.4 APLICACIÓN A EQUIPOS DE UNA PLANTA INDUSTRIAL

Se calcula la criticidad a 10 equipo (2 reactores, 2 tanques, 3 bombas, 1 intercambiador, 1 agitador y 1 polipasto). El valor de criticidad para cada uno de los equipos, calculado con el tipo de fiabilidad 1 es el que se muestra en la tabla 7.33.

El valor de criticidad para cada uno de los equipos, calculado con el tipo de fiabilidad 2 es el que se muestra en las tablas 7.34a y 7.34b. Para el tipo de fiabilidad 3 es el que se muestra en las tablas 7.35a y 7.35b.

**CÁLCULO DE CRITICIDAD DEL TIPO DE FIABILIDAD 1 PARA 10 EQUIPOS**

TIPO CARACTERÍSTICA	VARIABLES	CRITICIDAD	2453	2493	2833	2833	1763	2428	1728	2433	1793	798
			REACTOR 1	REACTOR 2	TANQUE 1	TANQUE 2	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 3	INTERCAMBIADOR	AGITADOR	POLIPASTO
tipos de equipo	Equipos Rotativos	80					1	1	1		1	1
tipos de equipo	Equipos de Intercambio de Calor	110	1	1						1		
tipos de equipo	Depósitos	75			1	1						
tipos de equipo	Valvulería	45										
tipos de equipo	Equipos Eléctricos	60										
tipos de procesos	Producción	210	1	1				1		1		
tipos de procesos	Logística	280							1			
tipos de procesos	Calidad	190										
tipos de procesos	Servicios	325			1	1	1				1	
tipos de procesos	Auxiliares	170										1
productos de trabajo	Materia Prima	400							1			
productos de trabajo	Producto Acabado	420	1	1				1		1		
productos de trabajo	Productos de Servicios	450			1	1	1				1	
variables técnicas	Geometría	38	1	1	1	1				1		
variables técnicas	Transmisión	18					1	1	1		1	1
variables técnicas	Estanqueidad	50	1	1	1	1		1	1	1		
variables técnicas	Dinámica	15					1	1	1		1	1
variables técnicas	Estática	100	1	1	1	1				1		
variables técnicas	Materiales	40	1	1	1	1		1	1	1		
variables técnicas	Eléctricas	100					1	1	1		1	1
variables técnicas	Requerimiento Productivo	140	1	1	1	1		1		1		
variables técnicas	Seguridad	150	1	1	1	1		1		1		
variables técnicas	Confiabilidad	210	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
tipos de producción	Continuo	150		1	1	1	1				1	
tipos de producción	Discontinuo	110	1									
tipos de producción	Bajo pedido	90						1	1	1		
variables legales	Reglamentación Industrial	120	1	1	1	1		1		1		
variables legales	Medio Ambiente	180	1	1	1	1		1		1		
variables legales	Seguridad	160	1	1	1	1		1		1		
variables económicas	Coste	235	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
variables económicas	Valor activo	135	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
variables económicas	Stock disponible	230			1	1						
variables económicas	Precio producto	310										
variables de intercambiabilidad	Reparable	45	1	1	1	1	1			1		1
variables de intercambiabilidad	Existencia de recambio	75						1	1		1	

Tabla 7.33- Valor de criticidad de 10 equipos con el tipo de fiabilidad 1

## CÁLCULO DE CRITICIDAD DEL TIPO DE FIABILIDAD 2 PARA 10 EQUIPOS

TIPO CARACTERÍSTICA	VARIABLES	CRITICIDAD	4100	3530	4425	4035	1557	2916	1276	2850	1200	587
			REACTOR 1	REACTOR 2	TANQUE 1	TANQUE 2	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 3	INTERCAMBIADOR	AGITADOR	POLIPASTO
tipos de equipo	Agitador	120									1	
tipos de equipo	Bomba rotodinámica	100					1	1	1			
tipos de equipo	Polipasto	45										1
tipos de equipo	Intercambiador de calor de tubos	120								1		
tipos de equipo	Tanque	240			1	1						
tipos de equipo	Reactor	140	1	1								
tipos de proceso	Reacción	280	1		1	1		1		1		
tipos de proceso	Transformación	250										
tipos de proceso	Destilación	220		1								
tipos de proceso	Almacenaje producto elaborado	195						1				
tipos de proceso	Agua	250					1				1	
tipos de producto	Agua	220					1				1	
tipos de producto	Líquido	140		1				1				
tipos de producto	Grasa	110								1		
tipos de producto	Hidrógeno	500			1							
tipos de producto	Amoníaco	500	1			1		1				
variables técnicas	Diámetro >1 m	90								1		
variables técnicas	Volumen 1	110	1		1	1						
variables técnicas	Volumen 2	80		1								
variables técnicas	Tipo transmisión 2	20				1						
variables técnicas	Tipo transmisión 3	10						1	1		1	
variables técnicas	Tipo transmisión 4	7										1
variables técnicas	Tipo cierre 1	130						1	1	1		
variables técnicas	Material junta 1	210	1		1	1						
variables técnicas	Material junta 2	155		1								
variables técnicas	Potencia 2	120					1					1
variables técnicas	Potencia 3	55						1	1		1	
variables técnicas	Presión de trabajo 1	230			1							
variables técnicas	Presión de trabajo 2	170	1			1				1		
variables técnicas	Presión de trabajo 3	120		1								
variables técnicas	Temperatura de trabajo 1	295	1		1	1						
variables técnicas	Temperatura de trabajo 2	240		1								
variables técnicas	PxV 2	40								1		
variables técnicas	Material 1	90	1		1							
variables técnicas	Material 2	65		1		1				1		
variables técnicas	Intensidad 3	60						1	1		1	1
variables técnicas	Caudal 2	90					1					
variables técnicas	Caudal 3	60						1	1			
variables técnicas	Producción horaria	180		1								
variables técnicas	Disponibilidad/anual	310	1		1	1						

Tabla 7.34a- Valor de criticidad de 10 equipos con el tipo de fiabilidad 2

## CÁLCULO DE CRITICIDAD DEL TIPO DE FIABILIDAD 2 PARA 10 EQUIPOS

TIPO CARACTERÍSTICA	VARIABLES	CRITICIDAD	REACTOR 1	REACTOR 2	TANQUE 1	TANQUE 2	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 3	INTERCAMBIADOR	AGITADOR	POLIPASTO
			4100	3530	4425	4035	1557	2916	1276	2850	1200	587
variables técnicas	Productividad	280						1		1		
variables técnicas	Protección IP 2	95						1				
variables técnicas	Fiabilidad	250	1		1			1	1			
variables técnicas	Mantenibilidad	205		1		1	1			1	1	1
tipos de producción	Continuo 365 días / año	350			1	1	1					
tipos de producción	Continuo 24 horas/día	180									1	
tipos de producción	Discontinuo > 75 % ocupación	290	1					1		1		
tipos de producción	Discontinuo 50 a 75 % ocupación	220		1								
tipos de producción	Discontinuo 25 a 50 % ocupación	140							1			
variables legales	Aparatos a presión (1)	300	1	1	1	1						
variables legales	Aparatos a presión (2)	220								1		
variables legales	Almacenaje productos químicos (1)	450	1		1	1						
variables legales	Almacenaje productos químicos (2)	380		1								
variables legales	REBT (2)	180						1				
variables legales	ISO 14000 (1)	240						1				
variables legales	ISO 14000 (2)	200								1		
variables legales	ISO 18000 (1)	250	1	1	1	1		1				
variables legales	ISO 18000 (2)	190								1		
variables económicas	Valor producto 1	340		1								
variables económicas	Valor producto 5	180	1									
variables económicas	Valor producto 6	100			1	1						
variables económicas	Stock disponible 1	290			1							
variables económicas	Stock disponible 4	100				1						
variables económicas	Stock disponible 5	80										
variables económicas	Precio equipo 3	125								1		
variables económicas	Precio equipo 4	110										
variables económicas	Precio equipo 5	100						1	1			1
variables económicas	Precio equipo 6	90					1					
variables económicas	Precio equipo 7	70									1	
variables económicas	Coste Mantenimiento 4	110					1					
variables económicas	Coste Mantenimiento 6	35						1	1			1
variables económicas	Coste Mantenimiento 7	15									1	
variables económicas	Coste insatisfacción cliente 1	440		1								
variables económicas	Coste insatisfacción cliente 3	320								1		
variables económicas	Coste insatisfacción cliente 6	220	1									
variables económicas	Plazo de entrega 1	90			1							
variables económicas	Plazo de entrega 4	20				1						
variables de intercambiabilidad	Hay recambio	2					1					
variables de intercambiabilidad	Intercambiable	1						1	1			
variables de intercambiabilidad	Baja intercambiabilidad	55	1	1								
variables de intercambiabilidad	No Intercambiable	80			1	1						
variables de intercambiabilidad	Reparable	15								1	1	1

Tabla 7.34b- Valor de criticidad de 10 equipos con el tipo de fiabilidad 2

CÁLCULO DE CRITICIDAD DEL TIPO DE FIABILIDAD 3 PARA 10 EQUIPOS												
TIPO CARACTERÍSTICA	VARIABLES	CRITICIDAD	4553	3518	5161	4170	1471	3118	1372	3022	1195	572.5
			REACTOR 1	REACTOR 2	TANQUE 1	TANQUE 2	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 3	INTERCAMBIADOR	AGITADOR	POLIPASTO
tipos de equipo	Agitador 7	144										1
tipos de equipo	Bomba rotodinámica 1	150						1				
tipos de equipo	Bomba rotodinámica 3	142							1			
tipos de equipo	Bomba rotodinámica 4	138					1					
tipos de equipo	Polipasto 3	44										1
tipos de equipo	Intercambiador de calor de tubos 3	168								1		
tipos de equipo	Tanque 1	360			1							
tipos de equipo	Tanque 3	328				1						
tipos de equipo	Reactor 1	210	1									
tipos de equipo	Reactor 3	196		1								
tipos de procesos	Reacción 1	420			1							
tipos de procesos	Reacción 2	400	1					1				
tipos de procesos	Reacción 3	380				1						
tipos de procesos	Reacción 7	300								1		
tipos de procesos	Destilación 1	330			1							
tipos de procesos	Almacenaje producto elaborado 6	183							1			
tipos de procesos	Agua 8	179					1					
tipos de procesos	Agua 9	151										1
productos de trabajo	Agua 2	220					1					1
productos de trabajo	Líquido 2	140		1					1			
productos de trabajo	Grasa 1	165								1		
productos de trabajo	Hidrógeno 2	500			1							
productos de trabajo	Amoniaco 2	500	1			1						
productos de trabajo	Amoniaco 3	250						1				
variables técnicas	Diámetro >1 m 9	88								1		
variables técnicas	Volumen 3	127			1							
variables técnicas	Volumen 7	121	1									
variables técnicas	Volumen 23	97				1						
variables técnicas	Volumen 37	76		1								
variables técnicas	Tipo transmisión 29	21					1					
variables técnicas	Tipo transmisión 33	19						1				
variables técnicas	Tipo transmisión 41	15									1	
variables técnicas	Tipo transmisión 55	8							1			
variables técnicas	Tipo transmisión 56	7,5										1
variables técnicas	Tipo cierre 2	158						1				
variables técnicas	Tipo cierre 17	128								1		
variables técnicas	Tipo cierre 24	114							1			
variables técnicas	Material junta 5	242			1							
variables técnicas	Material junta 14	224	1									
variables técnicas	Material junta 31	190				1						
variables técnicas	Material junta 57	138		1								
variables técnicas	Potencia 43	126					1					1
variables técnicas	Potencia 44	124										
variables técnicas	Potencia 45	122						1	1		1	
variables técnicas	Presión de trabajo 3	254			1							
variables técnicas	Presión de trabajo 27	182	1							1		
variables técnicas	Presión de trabajo 29	176				1						
variables técnicas	Presión de trabajo 39	146		1								
variables técnicas	Temperatura de trabajo 19	288			1							
variables técnicas	Temperatura de trabajo 24	268				1						
variables técnicas	Temperatura de trabajo 27	256	1									
variables técnicas	Temperatura de trabajo 34	228		1								
variables técnicas	PxV 28	56								1		
variables técnicas	Material 7	104	1									
variables técnicas	Material 11	100			1							
variables técnicas	Material 35	76		1								
variables técnicas	Material 39	72				1						
variables técnicas	Material 42	69								1		
variables técnicas	Intensidad 28	86						1				
variables técnicas	Intensidad 36	70										1
variables técnicas	Intensidad 42	58							1		1	
variables técnicas	Caudal 28	106					1					
variables técnicas	Caudal 30	102						1				
variables técnicas	Caudal 40	82							1			
variables técnicas	Producción horaria 7	180		1								
variables técnicas	Disponibilidad/anual 5	340			1							
variables técnicas	Disponibilidad/anual 7	320	1									
variables técnicas	Disponibilidad/anual 13	260				1						
variables técnicas	Productividad 5	288								1		

Tabla 7.35a- Valor de criticidad de 10 equipos con el tipo de fiabilidad 3

## CÁLCULO DE CRITICIDAD DEL TIPO DE FIABILIDAD 3 PARA 10 EQUIPOS

TIPO CARACTERÍSTICA	VARIABLES	CRITICIDAD	4553	3518	5161	4170	1471	3118	1372	3022	1195	572,5
			REACTOR 1	REACTOR 2	TANQUE 1	TANQUE 2	BOMBA 1	BOMBA 2	BOMBA 3	INTERCAMBIADOR	AGITADOR	POLIPASTO
variables técnicas	Productividad 7	272						1				
variables técnicas	Protección IP 14	108						1				
variables técnicas	Fiabilidad 4	266			1							
variables técnicas	Fiabilidad 6	250						1				
variables técnicas	Fiabilidad 7	242							1			
variables técnicas	Fiabilidad 9	226	1									
variables técnicas	Mantenibilidad 8	210				1				1		
variables técnicas	Mantenibilidad 9	200		1			1					
variables técnicas	Mantenibilidad 10	190										1
variables técnicas	Mantenibilidad 13	160									1	
tipos de producción	Continuo 365 días / año 2	408			1							
tipos de producción	Continuo 365 días / año 3	291				1	1					
tipos de producción	Continuo 24 horas/día 2	210										1
tipos de producción	Discontinuo > 75 % ocupación 2	338	1					1				
tipos de producción	Discontinuo > 75 % ocupación 3	241								1		
tipos de producción	Discontinuo 50 a 75 % ocupación 2	220		1								
tipos de producción	Discontinuo 25 a 50 % ocupación 2	140							1			
variables legales	Aparatos a presión 3	362			1							
variables legales	Aparatos a presión 5	334	1									
variables legales	Aparatos a presión 6	320				1						
variables legales	Aparatos a presión 8	292		1								
variables legales	Aparatos a presión 12	236								1		
variables legales	Almacenaje productos químicos 3	544			1							
variables legales	Almacenaje productos químicos 5	518	1									
variables legales	Almacenaje productos químicos 11	440				1						
variables legales	Almacenaje productos químicos 17	362		1								
variables legales	REBT 16	180						1				
variables legales	ISO 14000 6	270						1				
variables legales	ISO 14000 13	186								1		
variables legales	ISO 18000 4	324			1							
variables legales	ISO 18000 6	300	1									
variables legales	ISO 18000 8	276				1						
variables legales	ISO 18000 11	240						1				
variables legales	ISO 18000 12	228		1								
variables legales	ISO 18000 14	204								1		
variables económicas	Valor producto 12	274		1								
variables económicas	Valor producto 23	208	1									
variables económicas	Valor producto 35	136			1							
variables económicas	Valor producto 42	94				1						
variables económicas	Stock disponible 1	290			1							
variables económicas	Stock disponible 25	146				1						
variables económicas	Precio equipo 29	138								1		
variables económicas	Precio equipo 33	122						1				
variables económicas	Precio equipo 34	118							1			
variables económicas	Precio equipo 42	86					1					
variables económicas	Precio equipo 43	82										1
variables económicas	Precio equipo 45	74									1	
variables económicas	Coste Mantenimiento 27	102					1					
variables económicas	Coste Mantenimiento 40	50						1				
variables económicas	Coste Mantenimiento 43	38										1
variables económicas	Coste Mantenimiento 46	26									1	
variables económicas	Coste Mantenimiento 47	22							1			
variables económicas	Coste insatisfacción cliente 9	392		1								
variables económicas	Coste insatisfacción cliente 18	338								1		
variables económicas	Coste insatisfacción cliente 34	242	1									
variables económicas	Plazo de entrega 1	90			1							
variables económicas	Plazo de entrega 28	28				1						
variables de intercambiabilidad	Hay recambio 3	2					1					
variables de intercambiabilidad	Intercambiable 2	1						1	1			
variables de intercambiabilidad	Baja intercambiabilidad 2	70	1									
variables de intercambiabilidad	Baja intercambiabilidad 5	40		1								
variables de intercambiabilidad	No Intercambiable 6	110			1							
variables de intercambiabilidad	No Intercambiable 8	94				1						
variables de intercambiabilidad	Reparable 3	25								1		
variables de intercambiabilidad	Reparable 4	15									1	1

Tabla 7.35b- Valor de criticidad de 10 equipos con el tipo de fiabilidad 3

## 7.6 RESULTADOS

### 7.6.1 ASPECTOS LEGALES Y PUNTOS CRÍTICOS

Con el cálculo de criticidades según aspectos legales y puntos críticos de las instalaciones, se obtienen unos resultados muy adecuados para la representación de los diferentes aspectos por los cuales se rige una empresa industrial. Pero, el valor de criticidad se puede catalogar como cualitativo, ya que cada aspecto legal y punto crítico se valora con un único valor numérico.

### 7.6.2 ASPECTOS OPERATIVOS Y NIVELES DE IMPACTO

En el método de cálculo de criticidades según aspectos operativos y niveles de impacto, los valores de la variación de posiciones de la criticidad de los métodos de cálculo, para el caso de estudio son:

$$C_{LOGARÍTMICA}^C = 1.408$$

$$C_{PRIMOS}^C = 970$$

$$C_{BASE2}^C = 874$$

Por tanto, el menor valor de la variación o dispersión de posiciones de la criticidad, por los diferentes métodos de cálculo, es el método Base2. Es éste, el que se utiliza para mostrar el caso de estudio.

Lo que se está midiendo es la posición o grado de importancia de un activo, ello se mide con la criticidad. Pero, para cada método de cálculo resultará una posición u otra del orden de importancia de un activo respecto de los demás. Para poder seleccionar uno de los métodos de cálculo y presentar un caso de estudio, se comparan las posiciones en orden de importancia de la criticidad de una cantidad de activos, calculado para todos los métodos. Es por ello, que el método que hacia variar menos la posición del orden de importancia de la criticidad de los activos, respecto de los demás métodos; o sea, que tiene menor dispersión, es el método de Base2.

### 7.6.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS

Los resultados del caso de estudio del cálculo de criticidades según características de los equipos, para tres fiabilidades diferentes se muestran en la tabla 7.36, donde se indica una variación del resultado provocado por la mayor precisión de cada una de las variables que participan en cada uno de los estudios.

<b>CRITICIDAD EQUIPOS POR TIPOS DE FIABILIDAD</b>			
	<b>FIABILIDAD 1</b>	<b>FIABILIDAD 2</b>	<b>FIABILIDAD 3</b>
REACTOR 1	2.453	4.100	4.553
REACTOR 2	2.493	3.530	3.518
TANQUE 1	2.833	4.425	5.161
TANQUE 2	2.833	4.035	4.170
BOMBA 1	1.763	1.557	1.471
BOMBA 2	2.428	2.916	3.118
BOMBA 3	1.728	1.276	1.372
INTERCAMBIADOR	2.433	2.850	3.022
AGITADOR	1.793	1.200	1.195
POLIPASTO	798	587	573

Tabla 7.36- Valores de criticidad de 10 equipos para tipos de fiabilidad 1, 2 y 3

La diferencia entre valores de fiabilidad 1 y 2 es notable, ya que los resultados de fiabilidad 1 son obtenidos con poca cantidad de variables. Pero, en el caso de fiabilidad 2 al utilizar 282 variables los resultados ya son satisfactorios.

Existe diferencia entre los valores de criticidad de fiabilidad 2 y 3; pero, ya no son tan grandes como antes; ello debido, a que aunque se tenga mayor precisión en fiabilidad 3 es a partir de unas 250 variables cuando el resultado entra en la franja satisfactoria. Obteniendo una mayor calidad y precisión en el estudio de fiabilidad 3, en el que participan más de dos millares de variables.

Es necesario destacar, que se deben utilizar una cantidad de variables en concordancia con la diversidad y cantidad de equipos a los que se mide la criticidad. Si se calcula la criticidad a unas pocas decenas de equipos y muy diferentes entre sí, no es necesario un gran volumen de variables; pero, si se mide la criticidad a varios millares de equipos y muy parecidos, es necesario una gran cantidad de variables para poder expresar las diferencias entre ellos y determinar la criticidad de cada uno.

## 7.7 CONCLUSIONES

Una vez vistos tres métodos para calcular la criticidad; se llega a la conclusión, que el más idóneo es el de ponderación de características de equipos; ya que permite más flexibilidad en la precisión de los resultados según se tome una u otra población de variables existentes.

Los otros dos métodos de cálculo de la criticidad, son válidos para utilizarlos en entornos industriales donde hay una elevada presencia de características singulares de gran impacto, como es la seguridad y medio ambiente; donde, las legalizaciones de aparatos a presión son muy importantes tenerlos muy bien controlados. Estos métodos, son más pragmáticos y necesitan menos recursos para llegar a unos resultados adecuados del nivel de criticidad.

El método de cálculo de criticidad por ponderación de características es más flexible y adaptable a cualquier tipo de entorno industrial, donde se pueden utilizar desde unas pocas decenas de variables hasta algunas decenas de miles, según se quiera mayor o menor precisión. Un ejemplo de extremos para pocas decenas de variables es una carpintería que hace muebles a medida, donde la maquinaria no es muy sofisticada, además de pocas unidades; un ejemplo de necesidad de varias decenas de miles de variables es una industria nuclear donde la maquinaria es compleja, además de manejar muchos parámetros operacionales con grandes precisiones.



## 8

# AMFEC. APORTACIONES Y MEJORAS AL MÉTODO ACTUAL

Para conocer el método actual del AMFEC, ver capítulo 3 (apartado 3.1) y capítulo 4.

## 8.1 OBJETIVOS

A menudo, la realización de un AMFEC requiere de mucho tiempo de varias personas de varios departamentos industriales; ello es debido, a la gran variedad de formas por las cuales puede fallar una instalación, equipo o componente.

A pesar de la diversidad de los modos de fallos, se denota una repetición de algunos de ellos para diferentes equipos. Por tanto, una de las mejoras aportadas a la realización de un AMFEC, es la creación de bases de datos de modos de fallos para diversos equipos y valorar su frecuencia de fallos y detectabilidad. La gravedad no se valora, ya que se considera que es intrínseco de la situación en la que se haya el equipo de estudio.

Se establece la forma de definir modos de fallos en función de la estructuración de activos definida en el capítulo 6; así como, la valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad.

Un objetivo es mostrar varios modos de fallos de tipos de equipos característicos de la industria de procesos como son máquinas rotativas, intercambio de calor, depósitos y valvulería. En cada uno de ellos se mostrarán fallos típicos y valoración de frecuencia de fallos y detectabilidad. Para todos los equipos de un mismo tipo de equipo no proceden todos los modos de fallos, si es así no existirá valoración del riesgo.

En la presente investigación se realiza un desarrollo del NPR con al objetivo de interactuar fenómenos físicos y químicos ocurridos en máquinas e instalaciones con conceptos de NPR (Gravedad, Frecuencia de Fallos y Detectabilidad). También se presentan dos formas de trabajar con NPR. La vertiente macroscópica considera conceptos técnico-económicos para la evaluación del NPR. Por su parte, la vertiente microscópica, considera ecuaciones fundamentales de fenómenos físico-químicos.

Se encuentra la necesidad de desarrollar un método, que valore el NPR de un modo de fallo, en función de las diferentes situaciones en que se puede encontrar un equipo o instalación; determinadas por las variaciones de variables que rigen fenómenos físicos y químicos de su operatividad y funcionamiento, sin la necesidad de confeccionar otro AMFEC para la situación nueva.

Por último, la ponderación y rango de NPR es una muestra de la versatilidad que tiene este parámetro para determinar el riesgo del fallo. Mediante dos subcapítulos se indica cómo puede variar la ponderación del NPR en sus tres variables (gravedad, frecuencia de fallos y detectabilidad), según el entorno donde se aplique lo solicite. Los diferentes valores de rangos de NPR indican las franjas más a menos críticas que se deben definir, para catalogar el fallo según el impacto en riesgo que tenga.

## **8.2 IMPLEMENTACIÓN BASES DE DATOS DE MODOS DE FALLOS**

### **8.2.1 DESARROLLO Y PROCESO DE CÁLCULO**

La mejora que se aporta en la realización de AMFEC se realiza con un nivel de sistemas que corresponde al de equipos.

Por ello, se definen las clasificaciones de modos de fallos en la serie 8.1.

$$\begin{aligned}
 & \left\{ C_{S_1 1}^{MF}, C_{S_1 2}^{MF}, \dots, C_{S_1 q_1}^{MF}, \dots, C_{S_1 C_{S_1}^{MF}}^{MF} \right\} \\
 & \left\{ C_{S_2 1}^{MF}, C_{S_2 2}^{MF}, \dots, C_{S_2 q_2}^{MF}, \dots, C_{S_2 C_{S_2}^{MF}}^{MF} \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ C_{S_i 1}^{MF}, C_{S_i 2}^{MF}, \dots, C_{S_i q_i}^{MF}, \dots, C_{S_i C_{S_i}^{MF}}^{MF} \right\} \\
 & \dots \\
 & \left\{ C_{S_n 1}^{MF}, C_{S_n 2}^{MF}, \dots, C_{S_n q_n}^{MF}, \dots, C_{S_n C_{S_n}^{MF}}^{MF} \right\}
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

Siendo:

- $C_{S_i q_i}^{MF}$ : Clasificaciones de modos de fallos de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $q_i$ : Número de clasificación de modo de fallo de sistemas del nivel  $i$ .
- $C_{C_{S_i}^{MF}}^{MF}$ : Cantidad de clasificaciones de modos de fallos de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

Para conocer la cantidad de clasificaciones de modos de fallos de todos los niveles de los sistemas de forma genérica, para todos los sistemas se debe recurrir a la ecuación 8.2.

$$C_{C_{S_i}^{MF}}^{MF} = \sum_{i=1}^n C_{C_{S_i}^{MF}}^{MF} \tag{8.2}$$

Siendo:

- $C_{C_{S_i}^{MF}}^{MF}$ : Cantidad de aspectos clasificaciones de modos de fallos de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

La serie 8.3 muestra los modos de fallos de las clasificaciones para todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \Gamma_{C_{S_{i1}}^{MF}}^{u_{S_{i1}}} \right), \left( \Gamma_{C_{S_{i2}}^{MF}}^{u_{S_{i2}}} \right), \dots, \left( \Gamma_{C_{S_{iq_i}}^{MF}}^{u_{S_{iq_i}}} \right), \dots, \left( F_{C_{S_i}^{MF} C_{C_{S_i}^{MF}}} \right)_{C_{S_i}^{MF} C_{C_{S_i}^{MF}}} \\ \left( \Gamma_{C_{S_{j1}}^{MF}}^{u_{S_{j1}}} \right), \left( \Gamma_{C_{S_{j2}}^{MF}}^{u_{S_{j2}}} \right), \dots, \left( \Gamma_{C_{S_{jq_j}}^{MF}}^{u_{S_{jq_j}}} \right), \dots, \left( F_{C_{S_j}^{MF} C_{C_{S_j}^{MF}}} \right)_{C_{S_j}^{MF} C_{C_{S_j}^{MF}}} \\ \dots \\ \left( \Gamma_{C_{S_{i1}}^{MF}}^{u_{S_{i1}}} \right), \left( \Gamma_{C_{S_{i2}}^{MF}}^{u_{S_{i2}}} \right), \dots, \left( \Gamma_{C_{S_{iq_i}}^{MF}}^{u_{S_{iq_i}}} \right), \dots, \left( F_{C_{S_i}^{MF} C_{C_{S_i}^{MF}}} \right)_{C_{S_i}^{MF} C_{C_{S_i}^{MF}}} \\ \dots \\ \left( \Gamma_{C_{S_{n1}}^{MF}}^{u_{S_{n1}}} \right), \left( \Gamma_{C_{S_{n2}}^{MF}}^{u_{S_{n2}}} \right), \dots, \left( \Gamma_{C_{S_{nq_n}}^{MF}}^{u_{S_{nq_n}}} \right), \dots, \left( F_{C_{S_n}^{MF} C_{C_{S_n}^{MF}}} \right)_{C_{S_n}^{MF} C_{C_{S_n}^{MF}}} \end{array} \right\} \quad (8.3)$$

Siendo:

- $\left( \Gamma_{C_{S_{iq_i}}^{MF}}^{u_{S_{iq_i}}} \right)$  : Modos de fallos de clasificaciones de modos de fallos de niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $u_{S_{iq_i}}$  : Número de modo de fallo de cada clasificación de modo de fallo, por cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{S_i}^{MF}$  : Cantidad de modos de fallos de cada clasificación de modo de fallo, por cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

La valoración de la frecuencia de fallos y la detectabilidad se realiza mediante valores enteros entre 1 y 10. Las series 8.4 y 8.5 muestran las variables de valoración indicados.

$$\left. \begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & \left( \gamma_{C_{S_1}^{MF}}^F \right)_{u_{S_1}}, \left( \gamma_{C_{S_2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_{i_1}}^{MF}}^F \right)_{u_{S_{i_1}}}, \dots, \left( V_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}}^F \right)_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}} \\
 & \left( \gamma_{C_{S_2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_2}}, \left( \gamma_{C_{S_2^2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_2^2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_2^2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_2^2}}, \dots, \left( V_{C_{S_2}^{MF} C_{S_2}^{MF}}^F \right)_{C_{S_2}^{MF} C_{S_2}^{MF}} \\
 & \dots \\
 & \left( \gamma_{C_{S_1}^{MF}}^F \right)_{u_{S_1}}, \left( \gamma_{C_{S_2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_{i_1}}^{MF}}^F \right)_{u_{S_{i_1}}}, \dots, \left( V_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}}^F \right)_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}} \\
 & \dots \\
 & \left( \gamma_{C_{S_n}^{MF}}^F \right)_{u_{S_n}}, \left( \gamma_{C_{S_n^2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_n^2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_n^2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_n^2}}, \dots, \left( V_{C_{S_n}^{MF} C_{S_n}^{MF}}^F \right)_{C_{S_n}^{MF} C_{S_n}^{MF}}
 \end{aligned} \right\} \tag{8.4}
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned}
 & \left( \gamma_{C_{S_1}^{MF}}^D \right)_{u_{S_1}}, \left( \gamma_{C_{S_2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_{i_1}}^{MF}}^D \right)_{u_{S_{i_1}}}, \dots, \left( V_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}}^D \right)_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}} \\
 & \left( \gamma_{C_{S_2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_2}}, \left( \gamma_{C_{S_2^2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_2^2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_2^2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_2^2}}, \dots, \left( V_{C_{S_2}^{MF} C_{S_2}^{MF}}^D \right)_{C_{S_2}^{MF} C_{S_2}^{MF}} \\
 & \dots \\
 & \left( \gamma_{C_{S_1}^{MF}}^D \right)_{u_{S_1}}, \left( \gamma_{C_{S_2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_{i_1}}^{MF}}^D \right)_{u_{S_{i_1}}}, \dots, \left( V_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}}^D \right)_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}} \\
 & \dots \\
 & \left( \gamma_{C_{S_n}^{MF}}^D \right)_{u_{S_n}}, \left( \gamma_{C_{S_n^2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_n^2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_n^2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_n^2}}, \dots, \left( V_{C_{S_n}^{MF} C_{S_n}^{MF}}^D \right)_{C_{S_n}^{MF} C_{S_n}^{MF}}
 \end{aligned} \right\} \tag{8.5}
 \end{aligned}$$

Siendo:

- $\left( V_{C_{S_{q_i}}^{MF}}^F \right)_{u_{S_{q_i}}}$  : Valor entre 1 y 10 de frecuencia de fallos de cada modo de fallo de clasificaciones, de modos de fallos de niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $\left( V_{C_{S_{q_i}}^{MF}}^D \right)_{u_{S_{q_i}}}$  : Valor entre 1 y 10 de detectabilidad de cada modo de fallo de clasificaciones, de modos de fallos de niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

## 8.2.2 CASO DE ESTUDIO

Las tablas 8.1, 8.2, 8.3a, 8.3b y 8.4 muestran modos de fallo típicos, para los equipos de los tipos de equipo del presente estudio. Estas bases de datos, son recogidas de la experiencia, del histórico y de las bases de datos de hojas AMFEC realizadas en la industria de proceso. Las bases de datos, no representan todas las posibles causas de fallos; pero, si un alto porcentaje, con ello son muy útiles para utilizarlas en posteriores estudios de modos de fallos y facilitar la implantación del método RCM.

MODOS DE FALLO DE MÁQUINAS ROTATIVAS																		
CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C	Soplante		Ventilador		Agitador		Mezclador		Bomba		Compresor		Bomba de vacío			
			F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D		
FALLO MOTOR	EL MOTOR FUNCIONA SÓLO CON DOS FASES	FALLO DEVANADO DEL MOTOR	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5
		FALLO CONEXIONES EN EL MOTOR	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
		FALLO DE ALIMENTACIÓN	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2
	FALLO VENTILACIÓN	OBTURACIÓN REJILLA FILTRO	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4
		ROTURA DEL VENTILADOR	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2
	RODAMIENTOS CLAVADOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6
		FALLO DE ENGRASE	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4
		DESALINEACIÓN CONJUNTO	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
		MAL MONTAJE	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	VELOCIDAD MENOR	SOBRECARGA	8	4	8	4	8	4	8	4	8	4	8	4	8	4	8	4
		BAJA TENSIÓN	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4
	FALLO ACOPLAMIENTO	ROTURA CHAVETEROS	3	3			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
FALLO FIJACIÓN		5	3			5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	
FALLO ELEMENTO ELÁSTICO				2								6	2	6	2	6	2	
FALLO BOMBA	RODAMIENTOS CLAVADOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	5	6	5	6					5	6	5	6	5	6	5	6
		FALLO DE ENGRASE	6	4	6	4					6	4	6	4	6	4	6	4
		DESALINEACIÓN CONJUNTO	4	6	4	6					4	6	4	6	4	6	4	6
		MAL MONTAJE	6	6	6	6					6	6	6	6	6	6	6	6
	CLAVADA DE RODETE	INSERCIÓN DE PARTICULAS EN LA HOLGURA RODETE-CARCASA					7	7					5	7			5	7
		DESEQUILIBRADO RODETE					6	8					4	8			4	8
		ROTURA DE ANILLOS DE SEGURIDAD					6	6					5	6			5	6
		ABRASIÓN					4	8					5	8	5	8	5	8
	DESGASTE RODETE	CAVITACIÓN						8					5	8	5	8	5	8
		CORROSIÓN					3	8					5	8	5	8	5	8
		NPSH DE LA INSTALACIÓN MUY BAJO	3	2							3	2	9	2			9	2
	OBSTRUCCIÓN EN LA IMPULSIÓN	3	2							3	2	7	2	7	2	7	2	
	OBSTRUCCIÓN EN LA ASPIRACIÓN	3	2							3	2	7	2	7	2	7	2	
	ROTURA DE CUERPO BOMBA	2	2	2	2							3	2		2	3	2	
	ESTANQUEIDAD ESTOPADA Y CIERRE	DESGASTE CARAS DE ROCE	7	3								7	3	7	3	7	3	7
		ENVEJECIMIENTO	5	4								5	4	5	4	5	4	5
		MAL MONTAJE	6	6								6	6	6	6	6	6	6
	ESTANQUEIDAD JUNTAS CUERPO Y/O PALIER BOMBA	ENVEJECIMIENTO					2	2					4	2	4	2	4	2
		DESAPRIETE TORNILLOS					2	2					4	2	4	2	4	2
		MAL MONTAJE					4	3					8	3	8	3	8	3
		JUNTA INADECUADA					4	4					6	4	6	4	6	4
	FALLO TAPONES DE DESAIREACIÓN O LLENADO	4	2							4	2	5	2	5	2	5	2	
	TAPON DE VACIADO	3	2							3	2	5	2	5	2	5	2	
	FALLO EMBRIDADO ASPIRACIÓN Y/O IMPULSIÓN	FALLO JUNTA	4	4								4	4	4	4	4	4	4
DESAPRIETE TORNILLOS		4	3								4	3	4	3	4	3	4	
MAL MONTAJE		2	6	2	6							2	6	2	6	2	6	
FALLO REDUCTOR	RODAMIENTOS CLAVADOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	6	6	6	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
		FALLO DE ENGRASE	6	5	6	5	4	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5
		DESALINEACIÓN EJES	4	6	4	6	2	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
	MAL MONTAJE	6	7	6	7	4	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	
	ENGRANAJES CLAVADOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	6	6	6	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
		FALLO DE ENGRASE	6	5	6	5	4	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5
DESALINEACIÓN EJES Y/O RUEDAS DENTADAS		3	7	3	7	2	7	3	7	3	7	3	7	3	7	3	7	
MAL MONTAJE DE EJES Y/O RUEDAS	5	6	5	6	3	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6		
FALLO PALAS	ROTURA PALAS					3	4	3	4	3	4							
	DESGASTE PALAS					3	5	3	5	3	5							
FUGA CIERRE MECÁNICO	ROTURA CIERRE	FALLO REFRIGERACIÓN	8	5			5	7	5	8	5	9	5	6	5	9	5	
		FALTA PRESIÓN EN CIERRE	7	5			5	6	5	7	5	7	5	5	5	7	5	
		ERROR MONTAJE	8	4			4	7	4	8	4	10	4	6	4	10	4	
MENOR PÉRDIDA DE CARGA IMPULSIÓN	VÁLVULAS CERRADAS FUGAN INTERNAMENTE	5	4							5	4	4	4	4	4	4	4	

Tabla 8.1- Modos de fallos y valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad, para tipo de equipo Máquinas Rotativas

MODOS DE FALLO DE INTERCAMBIO DE CALOR																										
CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C	Intercambio de calor		Condensador		Reboller		Torre Refrigeración		Caldera aceite		Caldera vapor		Frigorífica		Climatizador		Columna destilación		Scrubber					
			F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D		
INTERCAMBIO DE CALOR DEFICIENTE	ENSUCIAMIENTO EXTERIOR DEL HAZ TUBULAR	ACUMULACIÓ DE PRODUCTO	7	3	7	3	6	3	7	3	4	3	4	3					3	5	3	5	3			
	ENSUCIAMIENTO INTERIOR DEL HAZ TUBULAR	ACUMULACIÓ DE IMPUREZAS POR CONTAMINACIÓN DE VAPOR	8	5	8	5	7	5	8	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	4	5	4	5		
	FALLO SUMINISTRO VAPOR	FALLO CALDERA	10	2	10	2	10	2	10	2	8	2	8	2	8	2	8	2	8	2						
FALLO CIRCULACIÓN DE VAPOR	FALLO PURGADOR		6	1	6	1	6	1			1	5	1	5	1	5	1	5	1		1		1			
FUGA EN TUBULADURA	ROTURA JUNTA	ERROR MONTAJE	6	4	6	4	6	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	4	6	4		
		FATIGA	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	3	5	3	5	3	5	3	5	4	5	4	5		
		DILATACIÓN POR TEMPERATURA	7	6	7	6	7	6				6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	6	7	6	
		ENVEJECIMIENTO	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	5	6	5	
		FALLO MECÁNICO	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	6	4	6	4
PORO EN CARCASA	CORROSIÓN DE SOLDADURAS		3	4	3	4	3	4				3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	2	4	2	4	
	CORROSIÓN CARCASA		3	1	3	1	3	1	2	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1
FUGA EN SOLDADURAS DE PLACA DEL HAZ TUBULAR	POROS		5	3	5	3	5	3				5	3	5	3	5	3				5	3	5	3		
	CORROSIÓN		2	3			2	3				2	3	2	3	2	3				2	3	2	3		
	EROSIÓN		3	3			3	3				3	3	3	3	3	3				3	3	3	3		
	ROTURA DE FATIGA POR DILATACIÓN		4	4			4	4				4	4	4	4	4	4				4	4	4	4		
FUGA EN HAZ TUBULAR	POROS	PORO CUERPO TUBERÍA	8	4	8	4				5	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	4	4	4	4	
		PORO SOLDADURA	7	7	7	7							5	7	5	7	5	7				7	3	7	3	7
		INTERNA POR VAPOR	4	8	4	8						4	8	4	8	4	8	4	8	4	8	4	8	2	8	2
	CORROSIÓN	INTERNA POR PRODUCTO	5	8	5	8						5	8	5	8	5	8	5	8			8	3	8	3	8
		ALTA VELOCIDAD DE PARTÍCULAS EN EL FLUIDO	6	9	6	9					2	9	6	9	6	9	6	9	6	9	6	9	4	9	4	9
		ROTURA DE FATIGA POR DILATACIÓN	5	6	5	6							5	6	5	6	5	6				5	6	5	6	

Tabla 8.2- Modos de fallos y valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad, para tipo de equipo Intercambio de Calor

MODOS DE FALLO DE DEPÓSITOS			Tanques		Reactores		Recipientes		Tolva		Demister	
CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D
BOCA DE HOMBRE	FUGA JUNTA		5	1	6	1	5	1	5	1	5	1
	JUNTA EMBRANQUE / VAINA		6	4	6	4	6	4	6	4	6	4
TOMA TI	VAINA		8	5	8	5	8	5	8	5	8	5
	ROSCA TANQUE/VALVULA		7	6	7	6	7	6			6	7
	VALVULA	CUERPO	7	2	7	2	7	2	7	2	7	2
		CIERRE	7	4	7	4	7	4	7	4	7	4
		ESTOPADA	7	4	7	4	7	4	7	4	7	4
PIS	ROSCA VÁLVULA/INSTRUMENTO		6	5	6	5					6	5
	INSTRUMENTO		6	2	6	2					6	2
LI	JUNTA		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	INSTRUMENTO		5	4	5	4	5	4	5	4	5	4
	FUGA JUNTA BRIDA CIEGA		5	3	5	3						
	FUGA JUNTA EMBRANQUE		5	3	5	3						
		CUERPO	5	2	5	2						
		CIERRE	5	5	5	5						
		FUELLE/ESTOPADA	5	5	5	5						
DRENAJE TANQUE	FUGA VÁLVULA		5	3	5	3						
	FALLO VÁLVULA EXCESO DE FLUJO		5	3	5	3						
	FUGA JUNTA EMBRANQUE VÁLVULA / LÍNEA ENVIO		5	4	5	4					5	4
	FUGA JUNTA EMBRANQUE DEPOSITO / VÁLVULA		5	4	5	4					5	4
		CUERPO	5	2	5	2					5	2
		CIERRE	5	5	5	5					5	5
		FUELLE/ESTOPADA	5	5	5	5					5	5
	FALLO VÁLVULA EXCESO DE FLUJO		5	3	5	3					5	3
	FUGA JUNTA EMBRANQUE VÁLVULA/LÍNEA ENVIO		4	4	4	4					4	4
	FUGA JUNTA EMBRANQUE DEPOSITO/VÁLVULA		4	4	4	4					4	4
		CUERPO	4	2	4	2					4	2
		CIERRE	4	5	4	5					4	5
		FUELLE/ESTOPADA	4	5	4	5					4	5
	FALLO VÁLVULA EXCESO DE FLUJO		4	3	4	3					4	3
	FUGA JUNTA EMBRANQUE VÁLVULA/LÍNEA ENVIO		4	6	4	6					4	6
	FUGA JUNTA EMBRANQUE DEPOSITO/VÁLVULA		4	5	4	5					4	5
		CUERPO	4	2	4	2					4	2
		CIERRE	4	5	4	5					4	5
		FUELLE/ESTOPADA	4	5	4	5					4	5
	FALLO VÁLVULA EXCESO DE FLUJO		4	4	4	4					4	4
	FUGA JUNTA INSTRUMENTO/EMBRANQUE		4	2	4	2					4	2
	CORROSIÓN TAPA INSTRUMENTO		3	1	3	1					3	1
FUGA POR CUERPO TANQUE			2	2	2	2					2	2
	CORROSIÓN INTERNA		3	9	3	9						
	CORROSIÓN EXTERNA		3	7	3	7						
	PORO EN SOLDADURA	SOLDADURA DEFICIENTE	4	8	4	8						
		DEFORMACIONES POR FATIGA	5	6	5	6						
	ROTURA	GOLPE POR ELEMENTO MECÁNICO (AGITADOR)	4	7	4	7						
	CORROSIÓN INTERNA		3	8	3	8						
	CORROSIÓN EXTERNA		3	4	3	4						
	PORO EN SOLDADURA	SOLDADURA DEFICIENTE	4	5	4	5						
	ROTURA	FATIGA	5	6	5	6						
	ROTURA JUNTAS		4	4	4	4						
	CORROSIÓN INTERNA		3	8	3	8						
	CORROSIÓN EXTERNA		3	4	3	4						
	PORO EN SOLDADURA	SOLDADURA DEFICIENTE	5	5	5	5						
	ROTURA	FATIGA	5	6	5	6						
	ROTURA JUNTAS		4	4	4	4						

Tabla 8.3a- Modos de fallos y valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad, para tipo de equipo Depósitos

MODOS DE FALLO DE DEPÓSITOS												
CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C	Tanques		Reactores		Recipientes		Tolva		Demister	
			F	D	F	D	F	D	F	D	F	D
PORO EN REACTOR	CORROSIÓN				2	7						
INDICACIÓN ERRÓNEA TEMPERATURA PRODUCTO	FALLO TRANSMISOR TEMPERATURA	FALLO AISLADOR GALVÁNICO	8	6	8	6						
		FALLO Sonda TEMPERATURA	8	4	8	4						
INDICACIÓN ERRÓNEA TEMPERATURA ACEITE	FALLO TRANSMISOR TEMPERATURA	FALLO AISLADOR GALVÁNICO	8	6	8	6						
		FALLO Sonda TEMPERATURA	8	4	8	4						
HOMOGENIZACIÓN DEL PRODUCTO DEFICIENTE	FALLO AGITADOR				6	2						
INDICACIÓN ERRÓNEA TEMPERATURA PRODUCTO	FALLO TRANSMISOR TEMPERATURA	FALLO AISLADOR GALVÁNICO	8	6	8	6						
		FALLO Sonda TEMPERATURA	8	4	8	4						
INDICACIÓN ERRÓNEA TEMPERATURA ACEITE	FALLO TRANSMISOR TEMPERATURA	FALLO AISLADOR GALVÁNICO	8	6	8	6						
		FALLO Sonda TEMPERATURA	8	4	8	4						
INTERCAMBIO DE CALOR DEFICIENTE	ENSUCIAMIENTO EXTERIOR DEL SERPENTÍN	ACUMULACIÓN DE PRODUCTO			4	3						
	ENSUCIAMIENTO INTERIOR DEL SERPENTÍN	ACUMULACIÓN DE IMPUREZAS ACEITE			4	6						
	ACEITE FRIO	FALLO CALDERA			7	2						
	INSUFICIENTE CIRCULACIÓN DE ACEITE	FALLO BOMBA IMPULSIÓN			9	3						
FALLO EN ENTRADA DE NITRÓGENO	FUGA VÁLVULA NITRÓGENO				7	4						
INDICACIÓN ERRÓNEA PRESIÓN	FALLO TRANSMISOR PRESIÓN	FALLO AISLADOR GALVÁNICO	8	6	8	6						
		FALLO Sonda PRESIÓN	6	4	6	4						
AUMENTO CANTIDAD DE AMONIACO	FALLO VÁLVULA REGULADORA	FALLO AISLADOR GALVÁNICO			6	6						
		FALLO ACTUACIÓN VÁLVULA			6	4						
	FALLO HOV	FALLO ESTANQUEIDAD VÁLVULA			6	5						
FUGA DEL SERPENTÍN INTERNO	CORROSIÓN INTERNA		3	9	3	9						
	CORROSIÓN EXTERNA		3	7	3	7						
	PORO EN SOLDADURA	SOLDADURA DEFICIENTE	4	6	4	6						
		FATIGA	3	6	3	6						
	ROTURA	GOLPE POR ELEMENTO MECÁNICO (AGITADOR)	3	5	3	5						
FALLO COMPRESOR	PARO COMPRESOR			8	1							
ENTRADA DE AGUA EN REACTOR	FUGA DEL CONDENSADOR			5	3	5	3					
FUGA EXTERIOR				5	1	5	1					
INDICACIÓN ERRÓNEA PRESIÓN	FALLO TRANSMISOR PRESIÓN	FALLO AISLADOR GALVÁNICO	8	6	8	6						
		FALLO Sonda PRESIÓN	8	4	8	4						
DISMINUCIÓN CANTIDAD DE AMONIACO	FALLO VÁLVULA REGULADORA	FALLO AISLADOR GALVÁNICO			7	6						
		FALLO ACTUACIÓN VÁLVULA			7	4						
	FALLO HOV	NO ABRE			7	3						
FALLO COMPRESOR	FALLO VARIADOR DE FRECUENCIA			8	5	8	5					

Tabla 8.3b- Modos de fallos y valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad, para tipo de equipo Depósitos

MODOS DE FALLO DE VALVULERÍA														
CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C	Válvula de alivio		Válvula reductora o de presión autorreguladora		Válvula de seguridad		Válvula manual		Mirilla		Apagallamas	
			F	D	F	D	F	D	F	D	F	D	F	D
FALLO ACTUACIÓN VÁLVULAS AUTOMÁTICAS	FALLO ACTUADOR PNEUMÁTICO				8	2								
	BOLA CLAVADA	BOLA SUCIA			4	6								
		BOLA RAYADA O DEFORMADA			4	7								
FALLO BRIDAS	ROTURA JUNTA	ERROR MONTAJE	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3
		FATIGA	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5
		DILATACIÓN POR TEMPERATURA	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5
		ENVEJECIMIENTO	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
		FALLO MECÁNICO	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2
	DESAPRIETE BRIDAS			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	FALLO MONTAJE			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
FALLO VÁLVULA DE SEGURIDAD	FUGA VÁLVULA	FALLO JUNTAS					2	4		4				
		PRESIÓN DE DISPARO MUY CERCA DE PRESIÓN DE TRABAJO						3		3				
		FALLO MUELLE						3		5				
		FALLO ASIENTO						2		6				
		ERROR MONTAJE	4	7	4	7				4		7		
FUGA EN TUBULADURA	ROTURA JUNTA	FATIGA	4	6	4	6				4		6		
		DILATACIÓN POR TEMPERATURA	4	6	4	6				4		6		
		ENVEJECIMIENTO	4	3	4	3				4		3		
		FALLO MECÁNICO	4	2	4	2				4		2		
		POROS	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
FUGA EN TUBERÍAS	CORROSIÓN	PORO SOLDADURA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
		INTERNA POR PRODUCTO	2	7	2	7	2	7	2	7	2	7	2	7
		CONTAMINACIÓN DE MATERIALES (CONT. DEL ACERO AL CARBONO AL ACERO INOXIDABLE)	2	8	2	8	2	8	2	8	2	8	2	8
		ALTA VELOCIDAD DE PARTÍCULAS EN EL FLUIDO	2	8	2	8	2	8	2	8	2	8	2	8
		ENVEJECIMIENTO	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5
FALLO VÁLVULAS Y ACCESORIOS	ROTURA DILATADOR	ROTURA DE FATIGA POR DILATACIÓN	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
		FALLO ESTOPADA	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		FALLO JUNTA CUERPO	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
		FALLO MIRILLA	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2
		EROSIÓN CRISTAL	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
FUGA EN SOLDADURA	DEFECTO PROCESO SOLDADURA	ROTURA JUNTA	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		FATIGA	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		CORROSIÓN EN SOLDADURA	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5	3	5
		ROTURA JUNTA	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5
		ROTURA JUNTA	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5
COMUNICACIÓN DEL TRACEADO DE VAPOR CON LA LÍNEA DE PRODUCTO	CORROSIÓN	CONTAMINACIÓN DE MATERIALES (CONT. DEL ACERO AL CARBONO AL ACERO INOXIDABLE)	4	7	4	7	4	7	4	7	4	7	4	7
SOLIDIFICACIÓN DE PRODUCTO QUÍMICO EN TUBERÍAS O VÁLVULAS	INSUFICIENTE CIRCULACIÓN DE VAPOR	FALLO VÁLVULA ENTRADA VAPOR	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		FALLO CALDERA	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2
		FALLO PURGADOR	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2
		ROTURA DE FUELLE	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5
		DESGASTE JUNTAS POR ENVEJECIMIENTO	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6
FALLO VÁLVULAS	FALLO VÁLVULA DE FONDO	FALLO ESTANQUEIDAD	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3
		ERROR MONTAJE	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		FATIGA	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6
		DILATACIÓN POR TEMPERATURA	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6	5	6
		ENVEJECIMIENTO	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6
AUMENTO DE LA PRESIÓN DE SELLADO	FALLO VÁLVULA DE ALIVIO			6	2	6	2	6	2	6	2	6	2	
	FALLO DEL AUTOREGULADOR DE NITRÓGENO			6	2	6	2	6	2	6	2	6	2	

Tabla 8.4- Modos de fallos y valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad, para tipo de equipo Valvulería

En cada tabla se recogen modos de fallos y se pondera su frecuencia de fallos (F) de 1 a 10 y su detectabilidad (D) de 1 a 10. Se considera que la gravedad es intrínseca de cada proceso operativo y no se puede automatizar.

Los valores de los modos de fallos en frecuencia de fallos y detectabilidad, son valores medios de procesos productivos de industria de proceso y se tomó como ejemplo para ilustrar el caso de estudio. En otro tipo de industria en otras situaciones, aparecen y desaparecen modos de fallos a los que se muestran y es posible con valores diferentes. Pero, para la industria de proceso, para cada tipo de equipo, los modos de fallos indicados son los más habituales en un % muy elevado.

## **8.3 ESTUDIO NPR (NÚMERO DE PONDERACIÓN DEL RIESGO)**

### **8.3.1 INTRODUCCIÓN**

En la realización de un estudio de AMFEC (Análisis de Modos de Fallos Efectos y Criticidad), se determina todos los fallos que pueden surgir en el funcionamiento de un activo; así como, su impacto en seguridad y medio ambiente, calidad, producción y mantenimiento. Posibilita asimismo una valoración de cada uno de estos fallos y cuantificarlos con un número que agrupa dicha valoración. Éste es el NPR, Número de Ponderación de Riesgo. Utilizado para cuantificar el riesgo que conlleva un fallo en una máquina o instalación. Se divide en tres componentes:

- **GRAVEDAD:** Impacto en seguridad y medio ambiente según el fallo ocurrido.
- **FRECUENCIA DE FALLOS:** Inversa del periodo o tiempo transcurrido entre fallos ocurridos en un equipo o instalación.
- **DETECTABILIDAD:** Mayor o menor dificultad de asociar un suceso ocurrido, a una causa o modo de fallo.

La ecuación 8.6 indica el valor del NPR para un modo de fallo determinado.

$$NPR \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}} = G \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}} \cdot F \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}} \cdot D \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}} \quad (8.6)$$

Siendo:

- $NPR \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}}$  : Número de Ponderación del Riesgo de un modo de fallos de clasificaciones, de modos de fallos de niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $G \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}}$  : Gravedad. Valor entero entre 1 y 10.
- $F \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}}$  : Frecuencia de Fallos. Valor entero entre 1 y 10.
- $D \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}}$  : Detectabilidad. Valor entero entre 1 y 10.

Uno de las desventajas de utilizar la ecuación 8.6 para calcular el NPR, es que su valoración es fija para la situación determinada en el AMFEC. Por ello, en los apartados 8.3.2 y 8.3.3 se desarrollan  $NPR_{MACROSCÓPICO}$  y  $NPR_{MICROSCÓPICO}$  se desarrollando formas diferentes de valoración de NPR.

## 8.3.2 NPR MACROSCÓPICO

El presente estudio, se apoya en la industria de proceso (petroleras, petroquímicas, químicas, farmacéuticas, alimentarias, cementeras,...) para realizar su estudio.

### 8.3.2.1 GRAVEDAD

Impacto en seguridad y medio ambiente según el fallo ocurrido. Además, puede tener implicación en:

- Compras: Disponibilidad de instalaciones a través de sistemas productivos.
- Logística: Disponibilidad de instalaciones y clientes.

- Calidad: Desviaciones de parámetros cualitativos.
- Producción: Desviaciones de parámetros productivos.
- Ingeniería: Afecta a instalaciones, debiendo aplicar reingeniería.
- Mantenimiento: Afecta a variables de mantenimiento y fiabilidad.

Cada concepto se puede dividir en el tipo de impacto ocurrido. La tabla 8.5 muestra diversos tipos de gravedad en función de diferentes conceptos técnico-económicos.

### 8.3.2.2 FRECUENCIA DE FALLOS

Inversa del periodo o tiempo transcurrido entre fallos ocurridos en un equipo o instalación. Puede acotarse en todo su valor de forma proporcional o de 0 a  $\infty$  según el tiempo ocurrido entre sucesos. A cada valor de la escala de 1 a 10 se corresponde con una frecuencia de fallos, pero desde la presente investigación y debido a la experiencia adquirida en diversas implantaciones, es necesario utilizar escalas de frecuencias de fallos para tipologías de equipos. Un ejemplo de ello, se muestra en la tabla 8.6, para tecnología de la industria de procesos.

TIPOS DE GRAVEDAD Y SU VALORACIÓN DE 1 A 10	
<b>MEDIO AMBIENTE</b>	
NUBE TÓXICA	10
CONTAMINACIÓN FLUVIAL	9
CONTAMINACIÓN DE SUELOS	9
<b>CALIDAD</b>	
PÉRDIDA CLIENTE	8
INSATISFACCIÓN CLIENTE	7
PÉRDIDA DE LOTE/STOCK	6
DESVIACIÓN PARÁMETRO	5
<b>PRODUCCION</b>	
PLANTA PARADA	5
AFECTACIÓN OPERABILIDAD	4
AFECTACIÓN EFICIENCIA kg/tiempo	5
<b>COMPRAS</b>	
GESTIÓN ALMACENES	4
GESTIÓN COMPRAS	4
GESTIÓN PRECIOS	3
GESTIÓN PROVEEDORES	3
<b>LOGISTICA</b>	
GESTIÓN STOCKS	6
GESTIÓN MATERIA PRIMA	7
GESTIÓN PRODUCTO ACABADO	5
GESTIÓN PRODUCTO SEMIELABORADO	5
<b>SEGURIDAD</b>	
EXPLOSIÓN	10
FUGA	8
MUERTE PERSONA	10
BAJA PERSONA	9
ACCIDENTE SIN BAJA	7
PROBABILIDAD ACCIDENTE	8
<b>INGENIERIA</b>	
NO FUNCIONAMIENTO INSTALACIÓN	6
PROBLEMAS DE PUESTA EN MARCHA	5
PROBLEMAS DE EFICIENCIA	7
MALA OPERABILIDAD	6
MALA MANTENIBILIDAD	6
<b>MANTENIMIENTO</b>	
MANTENIBILIDAD	5
LISTADO DE RECAMBIOS CRÍTICOS	7
MANTENIMIENTO PREVENTIVO	4
MANTENIMIENTO PREDICTIVO	4
INDICADORES DE GESTIÓN	5
<b>SERVICIOS</b>	
FLUIDOS	4
ELECTRICIDAD	5
COMUNICACIÓN	7
OFICINAS	2

Tabla 8.5-Tipos de gravedad en función de conceptos técnico-económicos

**FRECUENCIA DE FALLOS EN Nº SUCESOS / AÑO, PARA DIFERENTES GRUPOS DE EQUIPOS**

VALORACIÓN DE 1 A 10	MÁQUINAS ROTATIVAS	INTERCAMBIO DE CALOR	DEPÓSITOS	VALVULERÍA
1	0-0,1667	0-0,0667	0-0,05	0-0,2
2	0,1667-0,25	0,0667-0,1	0,05-0,0667	0,2-0,3333
3	0-25-0,5	0,1-0,1429	0,0667-1	0,3333-0,5
4	0,5-1	0,1429-0,2	0,1-0,1429	0,5-1
5	1-2	0,2-0,3333	0,1429-0,2	1-2
6	2-8	0,3333-1	0,2-0,5	2-8
7	8-24	1-2	0,5-1	8-24
8	24-52	2-4	1-2	24-52
9	52-156	4-12	2-4	52-156
10	165-365	12-24	4-12	156-365

Tabla 8.6- Frecuencias de fallos de tipologías de equipos de industria de procesos

**8.3.2.3 CÁLCULO**

A continuación se muestra como calcular el  $NPR_{MACROSCÓPICO}$ , a partir de la gravedad, frecuencia de fallos y detectabilidad.

- a) **Gravedad:** decidir a qué tipo de gravedad corresponde el modo de fallo. Si se pueden asociar varias afectaciones; o sea, varios tipos de gravedad, entonces se procederá a realizar una media aritmética de los valores de gravedad. Ver tabla 8.5.
- b) **Frecuencia de fallos:** dado un tipo de equipo al cual se le está realizando el estudio; la frecuencia de fallos vendrá determinado por la valoración que se le dé utilizando su escala correspondiente. Ver tabla 8.6.
- c) **Detectabilidad:** en la presente investigación, la detectabilidad no se realiza un desarrollo nuevo al que ya está postulado.

La serie 8.7 los tipos de gravedad.

$$\left\{ T_1^{NPR_{MACRO}}, T_2^{NPR_{MACRO}}, \dots, T_\alpha^{NPR_{MACRO}}, \dots, T_\mu^{NPR_{MACRO}} \right\} \quad (8.7)$$

Siendo:

- $T_\alpha^{NPR_{MACRO}}$  : tipos de gravedad

- $\alpha$  : Número de tipo de gravedad a los que afecta al modo de fallo de estudio.
- $\mu$  : Cantidad de tipos de gravedad que afecta al modo de fallo de estudio.

Dado un modo de fallo concreto, se calcula el valor del NPR macroscópico con la ecuación 8.8.

$$NPR_{MACROSCÓPICO} = \frac{1}{\mu} \cdot \sum_{\alpha=1}^{\mu} G_{\alpha}^{NPR_{MACRO}} \cdot F^{NPR_{MACRO}} \cdot D^{NPR_{MACRO}} \quad (8.8)$$

Siendo:

- $NPR_{MACROSCÓPICO}$  : Valor del Número de Ponderación del Riesgo, calculado con el método macroscópico.
- $G_{\alpha}^{NPR_{MACRO}}$  : Gravedad de cada tipo de gravedad que afecta al modo de fallo concreto. Valorado de 1 a 10.
- $F^{NPR_{MACRO}}$  : Frecuencia de fallos. Valorado de 1 a 10.
- $D^{NPR_{MACRO}}$  : Detectabilidad. Valorado de 1 a 10.

### 8.3.3 NPR MICROSCÓPICO

En los equipos e instalaciones industriales existen fenómenos físico-químicos, cada uno de estos fenómenos disponen de ecuaciones para definirlos, que a su vez contienen variables científicas.

Los fenómenos físico-químicos con los cuales se trabaja en la presente investigación son:

- **Transferencia de calor:** Estudio de la transmisión de calor a través de un medio o a través de diferentes cuerpos.

- **Dinámica de fluidos ó mecánica de fluidos:** Estudio del comportamiento de fluidos al moverse y su interacción con estructuras de equipos.
- **Fatiga de materiales:** Estudio de la resistencia y fatiga de los materiales, sometidos a cargas estáticas o fluctuantes en el tiempo.
- **Reacciones químicas:** Estudio del comportamiento de las moléculas de cada una de las sustancias que participan en la reacción química.

Para aclarar, el funcionamiento del método de cálculo del NPR en la vertiente microscópico se observa la figura 8.1.



Figura 8.1- Espacio vectorial  $R^5$  para el cálculo del  $NPR_{MICROSCÓPICO}$

La figura 8.1 expresa la estructura del espacio vectorial en el que se integra el  $NPR_{MICROSCÓPICO}$ ; desde la dimensión 5 que es la variación en % de las variables (dimensión 4) que participan en las ecuaciones (dimensión 3), de los fenómenos físico-químicos (dimensión 2), de las tres partes en las que se dividen el NPR (gravedad, frecuencia de fallos y detectabilidad (dimensión 1)).

Por tanto, una variación en el porcentaje del valor de una variable produce una variación en el  $NPR_{MICROSCÓPICO}$  del modo de fallo de estudio, a través de influenciarles en las demás dimensiones del espacio vectorial  $R^5$  definido.

### 8.3.3.1 CÁLCULO

La ecuación que rige el valor del  $NPR_{MICROSCÓPICO}$  de un modo de fallo específico, tiene en cuenta en el presente desarrollo los términos gravedad, frecuencia de fallos y detectabilidad. Los dos primeros términos muestran un espacio vectorial  $R^5$ , donde cada dimensión es respectivamente gravedad ó frecuencia de fallos, fenómeno físico-químico, ecuación, variable y variación de variable.

La ecuación 8.9, indica de qué depende el  $NPR_{MICROSCÓPICO}$  de un modo de fallo en concreto, para los diferentes conceptos mencionados en la descripción de la ecuación.

$$NPR_{MICROSCÓPICO} = f \left[ \begin{array}{cccccccc} G_{\beta}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi\delta}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi\delta\varepsilon}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi\delta\varepsilon\phi}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi\delta\varepsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi\delta\varepsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & \text{Gráfico} \\ F_{\beta}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta\delta}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta\delta\varepsilon}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta\delta\varepsilon\phi}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta\delta\varepsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta\delta\varepsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & \text{Gráfico} \\ D_{\beta}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta\varepsilon}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta\varepsilon\phi}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta\varepsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta\varepsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta\varepsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & \text{Gráfico} \end{array} \right] \quad (8.9)$$

Siendo:

- $\chi$ : tipo de gravedad (nube tóxica, pérdida cliente, mantenimiento, gestión de stocks, etc.).
- $\beta$ : modo de fallo de un equipo del estudio AMFEC.
- $\eta$ : tipo de frecuencia de fallos por tipos de equipos.
- $\delta$ : fenómenos físico-químicos del equipo (transferencia de calor, mecánica de fluidos, fatiga de materiales, reacciones químicas).
- $\varepsilon$ : ecuaciones de los fenómenos físico-químicos.

- $\phi$  : variables de proceso (temperatura, presión, potencia, masa,...).
- $\gamma$  : punto de trabajo de variables de proceso respecto punto de diseño (...50%, 60%,..., 100%,..., 130%, 140%,...).
- $g_{\beta\chi\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}}$  : valor de gravedad (1...10).
- $f_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}}$  : valor de frecuencia de fallos (1...10).
- $d_{\beta\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}}$  : valor de detectabilidad (1...10).
- $G_{\beta}^{NPR_{MICRO}}$  : Gravedad. Calculado con la ecuación 8.10.
- $F_{\beta}^{NPR_{MICRO}}$  : Frecuencia de fallos. Calculado con la ecuación 8.11.
- $D_{\beta}^{NPR_{MICRO}}$  : Detectabilidad. Calculado con la ecuación 8.12.

$$G_{\beta}^{NPR_{MICRO}} = \frac{\sum_{\chi}^X \sum_{\delta}^{\Delta} \sum_{\epsilon}^E \sum_{\phi}^{\Phi} \sum_{\gamma}^H g_{\beta\chi\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} \cdot P_{\beta\chi\delta\epsilon\phi\gamma}}{\sum_{\chi}^X \sum_{\delta}^{\Delta} \sum_{\epsilon}^E \sum_{\phi}^{\Phi} \sum_{\gamma}^H P_{\beta\chi\delta\epsilon\phi\gamma}} \quad (8.10)$$

$P_{\beta\chi\delta\epsilon\phi\gamma}$  : 0 ó 1 en función que aparezca la variable  $\phi$  en la ecuación  $\epsilon$  , para los tipos de gravedades.

$$F_{\beta}^{NPR_{MICRO}} = \frac{\sum_{\eta}^I \sum_{\delta}^{\Delta} \sum_{\epsilon}^E \sum_{\phi}^{\Phi} \sum_{\gamma}^H f_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} \cdot P_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}}{\sum_{\eta}^I \sum_{\delta}^{\Delta} \sum_{\epsilon}^E \sum_{\phi}^{\Phi} \sum_{\gamma}^H P_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}} \quad (8.11)$$

$P_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}$  : 0 ó 1 en función que aparezca la variable  $\phi$  en la ecuación  $\epsilon$  , para los tipos de frecuencias de fallos.

$$D_{\beta}^{NPR_{MICRO}} = \frac{\sum_{\delta}^{\Delta} \sum_{\varepsilon}^E \sum_{\phi}^{\Phi} \sum_{\gamma}^H d_{\beta\delta\varepsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} \cdot P_{\beta\delta\varepsilon\phi\gamma}}{\sum_{\delta}^{\Delta} \sum_{\varepsilon}^E \sum_{\phi}^{\Phi} \sum_{\gamma}^H P_{\beta\delta\varepsilon\phi\gamma}} \quad (8.12)$$

$P_{\beta\delta\varepsilon\phi\gamma}$ : 0 ó 1 en función que aparezca la variable  $\phi$  en la ecuación  $\varepsilon$  en la detectabilidad.

Siendo:

- X: tipo de gravedad (nube tóxica, pérdida cliente, mantenimiento, gestión de stocks, etc.).
- B: modo de fallo de un equipo del estudio AMFEC.
- I: tipo de frecuencia de fallos por tipos de equipos.
- $\Delta$ : fenómenos físico-químicos del equipo (transferencia de calor, mecánica de fluidos, fatiga de materiales, reacciones químicas).
- E: ecuaciones de los fenómenos físico-químicos.
- $\Phi$ : variables de proceso (temperatura, presión, potencia, masa,...).
- H: punto de trabajo de variables de proceso respecto punto de diseño (...50%, 60%,..., 100%,..., 130%, 140%,...).

La ecuación 8.13, indica el valor del número de ponderación de riesgo microscópico.

$$NPR_{MICROSCÓPICO} = G_{\beta}^{NPR_{MICRO}} \cdot F_{\beta}^{NPR_{MICRO}} \cdot D_{\beta}^{NPR_{MICRO}} \quad (8.13)$$

### 8.3.3.2 CASO DE ESTUDIO DE NPR MICROSCÓPICO. CÁLCULO DE NPR DEL MODO DE FALLO RODAMIENTO DETERIORADO EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Cálculo de la variación del NPR del modo de fallo rodamiento deteriorado, en una bomba centrífuga. Para ello, se hace servir la fuerza de empuje radial. Aparece

cuando se trabaja con caudales que difieren del punto óptimo que da el máximo rendimiento de la bomba.

La tabla 8.7 y la gráfica 8.1 muestran el comportamiento de la fuerza de empuje radial en función de la desviación del caudal de la bomba respecto al de diseño.

**CONDICIONES DE TRABAJO DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA**

Q (m3/h)	Hm (m.c.a.)	Rend.(%)	Fo (kN)
3,32	33,12	7,06	274,09
17,19	32,87	33,13	245,19
24,77	32,75	42,82	217,41
38,03	32,27	56,25	178,24
53,55	31,69	68,02	141,35
65,49	30,82	72,32	102,75
73,96	29,90	74,64	83,77
83,08	28,08	76,79	60,08
89,87	27,06	76,47	38,99
96,22	25,42	73,28	17,07
99,25	24,23	71,09	3,75
103,70	22,29	67,15	19,24
107,97	20,47	62,08	43,25
115,21	16,95	52,68	69,02
119,53	10,62	33,90	104,14
120,08	5,37	17,35	122,97

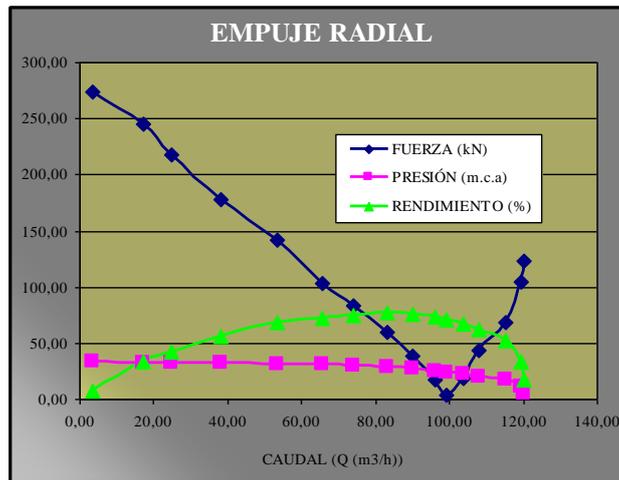


Tabla 8.7 y gráfica 8.1 - Fuerza de empuje radial respecto el caudal de trabajo

Siendo:

- Q: Caudal de la bomba en m<sup>3</sup>/h.

- Hm: Altura manométrica (presión) a la cual es impulsado el fluido por la bomba en m.c.a. (metros de columna de agua).
- Rend.: Rendimiento de la bomba para cada regulación de caudal en %.
- Fo: Fuerza de empuje radial, en kN.

Con los valores de la fuerza de empuje radial, se puede estudiar el comportamiento del mayor o menor desgaste de rodamientos a través de su vida, gracias a la ecuación 8.14.

$$C_{10} \left( n_R 60 \right)^{3a} = F_D \left( n_D 60 \right)^{3a} \quad (8.14)$$

Siendo:

- $C_{10}$  = Carga clasificada del rodamiento en kN.
- $L_R$  = Vida nominal en horas del rodamiento.
- $n_R$  = Velocidad nominal en rev. / min.
- $a$  = Coeficiente de tipo de rodamientos; 3 para rígidos de bolas.
- $F_D$  = carga radial del rodamiento en kN
- $L_D$  = Vida deseada del rodamiento en horas.
- $n_D$  = Velocidad deseada en rev. / min.

**VIDA DE RODAMIENTOS EN FUNCIÓN DEL PUNTO DE TRABAJO DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA. SU IMPLICACIÓN EN EL NPR A TRAVÉS DEL MODO DE FALLO RODAMIENTO DETERIORADO**

Q (m3/h)	Fd (kN)	Ld (horas)	G	F	D	NPR
3,32	274,09	37,19	7	10	8	560
17,19	245,19	51,95	7	9	7	441
24,77	217,41	74,52	6	9	7	378
38,03	178,24	135,24	6	8	7	336
53,55	141,35	271,13	5	8	6	240
65,49	102,75	706,02	5	7	6	210
73,96	83,77	1.302,74	4	6	5	120
83,08	60,08	3.530,65	4	5	5	100
89,87	38,99	12.916,63	3	3	4	36
96,22	17,07	153.933,16	2	2	4	16
99,25	3,75	14.533.249,84	1	1	4	4
103,70	19,24	107.537,91	2	2	4	16
107,97	43,25	9.465,66	2	3	5	30
115,21	69,02	2.328,67	3	5	5	75
119,53	104,14	678,14	4	7	6	168
120,08	122,97	411,80	5	8	6	240

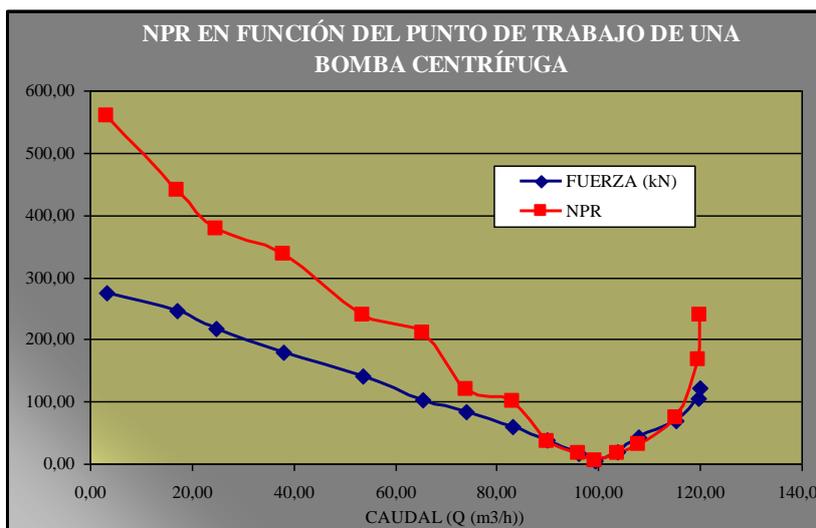


Tabla 8.8 y gráfica 8.2 - Vida y NPR del modo de fallo rodamiento deteriorado, para diferentes puntos de trabajo respecto del punto de diseño de una bomba centrífuga

### 8.3.4 PONDERACIÓN DE NPR

El Número de Ponderación del Riesgo (NPR) lo forman tres elementos que se multiplican entre sí gravedad, frecuencia de fallos y detectabilidad.

Todos ellos se ponderan del 1 a 10. Pero, es posible que en algunos casos sea necesario ponderar de forma más importante un concepto que otro. Lo normal es que una máquina o instalación, se deba valorar más su gravedad que la frecuencia de fallos o detectabilidad. De esta forma se han confeccionado las tablas 8.9a, 8.9b y 8.9c, donde se selecciona una combinación de ponderación del NPR en función de cada máquina.

Véase las diferentes combinaciones que se muestran, la multiplicación de los tres valores debe dar 1, con ello se demuestra que el decremento de la ponderación de un concepto del NPR es el incremento de otro.

Aparecen un total de 158 combinaciones. La frecuencia de fallos y la detectabilidad se varían entre 0,5 y 1, con incrementos de 0,1; en las combinaciones que se fuerzan a ser estos valores y de 1 a 2, también en incrementos de 0,1 en la gravedad. Para establecer toda la combinación, la fórmula consiste en una ecuación de primer grado con una incógnita, que es la variable que se deja dependiente de las otras dos. En las combinaciones, los 3 conceptos son sometidos a todas las situaciones.

Las combinaciones marcadas en rojo son consideradas no aconsejables de escoger; pero no por ello, se deben dejar de escoger si la instalación lo requiere.

La selección de la combinación por cada máquina es un ejemplo de selección, pudiéndose escoger otra, si se cree conveniente. Lo que hay que tener en cuenta, que la selección de las combinaciones se ha realizado con un criterio lógico de funcionamiento de las máquinas y por tanto es una selección estándar utilizable en la mayoría de instalaciones de plantas de procesos.

PONDERACIÓN DE FACTORES DE VALORACIÓN DEL RIESGO EN FUNCIÓN DEL EQUIPO DE ESTUDIO				NPR	MÁQUINAS	INTERCAMBIO CALOR	DEPÓSITOS	VALVULERÍA Y OTROS
nº COMBINACIÓN	GRAVEDAD	FRECUENCIA DE FALLOS	DETECTABILIDAD					
					Soplante			
					Ventilador			
					Agitador			
					Mezclador			
					Bomba			
					Compresor			
					Bomba vacío			
					Intercambiador de calor			
					Condensador			
					Reboiler			
					Torre Refrigeración			
					Caldera aceite			
					Caldera vapor			
					Frigorífica			
					Climatizador			
					Columna Destilación			
					Scrubber			
					Tanque			
					Reactor			
					Recipiente			
					Tolva			
					Demister			
					Válvula manual			
					Válvula de seguridad			
					Válvula de alivio			
					Válvula reductora o de presión			
					Disco de ruptura			
					Mirilla			
					Apagalamas			
					TIV – Válvula control lazo temperatura			
					LIV – Válvula control lazo nivel			
					PIV – Válvula control lazo presión			
					FIV – Válvula control lazo caudal			
					WIV - Válvula control lazo peso			
					AIV - Válvula control lazo análisis			
					HOV – Válvula automática			
1	1,00	0,50	2,00					
2	1,10	0,50	1,82					
3	1,20	0,50	1,67					
4	1,30	0,50	1,54					
5	1,40	0,50	1,43					
6	1,50	0,50	1,33					
7	1,60	0,50	1,25					
8	1,70	0,50	1,18					
9	1,80	0,50	1,11					
10	1,90	0,50	1,05					
11	2,00	0,50	1,00			X		
12	1,00	0,60	1,67					
13	1,10	0,60	1,52					
14	1,20	0,60	1,39					
15	1,30	0,60	1,28					
16	1,40	0,60	1,19					
17	1,50	0,60	1,11					
18	1,60	0,60	1,04					
19	1,70	0,60	0,98					
20	1,80	0,60	0,93					
21	1,90	0,60	0,88			X		
22	2,00	0,60	0,83					
23	1,00	0,70	1,43					
24	1,10	0,70	1,30					
25	1,20	0,70	1,19					
26	1,30	0,70	1,10					
27	1,40	0,70	1,02					
28	1,50	0,70	0,95					
29	1,60	0,70	0,89					
30	1,70	0,70	0,84					
31	1,80	0,70	0,79					
32	1,90	0,70	0,75					
33	2,00	0,70	0,71					
34	1,00	0,80	1,25					
35	1,10	0,80	1,14					
36	1,20	0,80	1,04					
37	1,30	0,80	0,96				X	X X
38	1,40	0,80	0,89					
39	1,50	0,80	0,83					
40	1,60	0,80	0,78					
41	1,70	0,80	0,74					
42	1,80	0,80	0,69					
43	1,90	0,80	0,66					
44	2,00	0,80	0,63					
45	1,00	0,90	1,11					
46	1,10	0,90	1,01					
47	1,20	0,90	0,93					X
48	1,30	0,90	0,85					
49	1,40	0,90	0,79					
50	1,50	0,90	0,74					
51	1,60	0,90	0,69					
52	1,70	0,90	0,65					
53	1,80	0,90	0,62					
54	1,90	0,90	0,58					
55	2,00	0,90	0,56					
56	1,00	1,00	1,00					

Tabla 8.9a – Ponderación NPR en función de variación de factores, por equipos

PONDERACIÓN DE FACTORES DE VALORACIÓN DEL RIESGO EN FUNCIÓN DEL EQUIPO DE ESTUDIO					
	NPR	MÁQUINAS	INTERCAMBIO CALOR	DEPÓSITOS	VALVULERÍA Y OTROS
nº COMBINACIÓN					
GRAVEDAD					
FRECUENCIA DE FALLOS					
DETECTABILIDAD					
		Soplante			
		Ventilador			
		Agitador			
		Mezclador			
		Bomba			
		Compresor			
		Bomba vacío			
		Intercambiador de calor			
		Condensador			
		Reboiler			
		Torre Refrigeración			
		Caldera aceite			
		Caldera vapor			
		Frigorífica			
		Climatizador			
		Columna Destilación			
		Scrubber			
		Tanque			
		Reactor			
		Recipiente			
		Tolva			
		Demister			
		Válvula manual			
		Válvula de seguridad			
		Válvula de alivio			
		Válvula reductora o de presión			
		Disco de ruptura			
		Mirilla			
		Apagallamas			
		TIV – Válvula control lazo temperatura			
		LIV – Válvula control lazo nivel			
		PIV – Válvula control lazo presión			
		FIV – Válvula control lazo caudal			
		WIV - Válvula control lazo peso			
		AIV - Válvula control lazo análisis			
		HOV – Válvula automática			
57	1,10	1,00	0,91		
58	1,20	1,00	0,83		
59	1,30	1,00	0,77		
60	1,40	1,00	0,71		
61	1,50	1,00	0,67		
62	1,60	1,00	0,63		
63	1,70	1,00	0,59		
64	1,80	1,00	0,56		
65	1,90	1,00	0,53		
66	2,00	1,00	0,50		
67	1,00	2,00	0,50		
68	1,10	1,82	0,50		
69	1,20	1,67	0,50		
70	1,30	1,54	0,50		
71	1,40	1,43	0,50		
72	1,50	1,33	0,50		
73	1,60	1,25	0,50		
74	1,70	1,18	0,50		
75	1,80	1,11	0,50		
76	1,90	1,05	0,50		
77	2,00	1,00	0,50		
78	1,00	1,67	0,60		
79	1,10	1,52	0,60		
80	1,20	1,39	0,60		
81	1,30	1,28	0,60		
82	1,40	1,19	0,60		
83	1,50	1,11	0,60		
84	1,60	1,04	0,60		
85	1,70	0,98	0,60		
86	1,80	0,93	0,60		X
87	1,90	0,88	0,60		
88	2,00	0,83	0,60		
89	1,00	1,43	0,70		
90	1,10	1,30	0,70		
91	1,20	1,19	0,70		
92	1,30	1,10	0,70		
93	1,40	1,02	0,70		
94	1,50	0,95	0,70		X
95	1,60	0,89	0,70		
96	1,70	0,84	0,70		
97	1,80	0,79	0,70		
98	1,90	0,75	0,70		
99	2,00	0,71	0,70		
100	1,00	1,25	0,80		
101	1,10	1,14	0,80		
102	1,20	1,04	0,80		
103	1,30	0,96	0,80		
104	1,40	0,89	0,80		X
105	1,50	0,83	0,80		X
106	1,60	0,78	0,80		X
107	1,70	0,74	0,80		X
108	1,80	0,69	0,80		
109	1,90	0,66	0,80		
110	2,00	0,63	0,80		X
111	1,00	1,11	0,90		X
112	1,10	1,01	0,90		

Tabla 8.9b – Ponderación NPR en función de variación de factores, por equipos



### 8.3.5 RANGO NPR

Para conocer la magnitud de la criticidad de un efecto producido por una causa de fallo, con una valoración de riesgo, se debe poder diferenciar en nivel crítico, normal o poco importante. Con lo que se tiene un intervalo de valores para el NPR.

Como el comportamiento de máquina es diferente y por tanto los efectos producidos también son diferentes, se pondera el NPR de forma personalizada para cada máquina, tal y como se muestra en la tabla 8.10. Estos valores pueden ser variados e incluso debe ser un sistema dinámico, para que después de unas pruebas en las instalaciones de diferentes centros industriales o productivos, se retoquen según las necesidades. Lo que si debe quedar claro, es que es necesario separar en tres niveles, para tener un criterio de selección de la intervención de mantenimiento que se crea conveniente y declarar una frecuencia de actuación de dichas intervenciones.

Los valores de rango de NPR van desde 1 hasta 1000; valorando de 1 a 10 la gravedad, frecuencia de fallos y detectabilidad y siendo el valor de NPR una multiplicación de cada uno de ellos.

La diferencia de valores en los rangos de NPR para diferentes tipos de equipo, principalmente son causados por las diferentes consecuencias que pueden provocar para seguridad y medio ambiente los equipos de estudio. Ello se transforma en un valor más o menos elevado de gravedad; con lo que NPR varía en proporción a éste. En términos de frecuencia de fallos y detectabilidad no le afecta tanto la diversidad de tipos de equipo.

<b>RANGO NPR</b>				
<b>TIPO EQUIPO</b>	<b>EQUIPO</b>	<b>CRÍTICO</b>	<b>NORMAL</b>	<b>POCO IMPORTANTE</b>
<b>MÁQUINAS ROTATIVAS</b>	Soplante	600-1000	599-200	0-199
	Ventilador	600-1000	599-200	0-199
	Agitador	600-1000	599-200	0-199
	Mezclador	600-1000	599-200	0-199
	Bombas	800-1000	799-300	0-299
	Compresores	800-1000	799-300	0-299
	Bombas de Vacío	700-1000	699-300	0-299
<b>INTERCAMBIO DE CALOR</b>	Intercambiado de Calor	800-1000	799-300	0-299
	Condensador	800-1000	799-300	0-299
	Reboiler	600-1000	599-200	0-199
	Torre Refrigeración	600-1000	599-200	0-199
	Estufa Vapor	600-1000	599-200	0-199
	Estufa Aire	600-1000	599-200	0-199
	Caldera Aceite	700-1000	699-300	0-299
	Caldera Vapor	700-1000	699-300	0-299
	Frigorífica	600-1000	599-200	0-199
	Climatizador	500-1000	499-200	0-199
	Columna Destilación	800-1000	799-300	0-299
	Scrubber	700-1000	699-300	0-299
	Columna Intercambio	700-1000	699-300	0-299
<b>DEPÓSITOS</b>	Tanques	800-1000	799-300	0-299
	Reactores	800-1000	799-300	0-299
	Recipientes	600-1000	599-200	0-199
	Tolva	400-1000	399-150	0-149
	Demister	600-1000	599-200	0-199
<b>VALVULERÍA</b>	Válvula manual	500-1000	499-200	0-199
	Válvula de seguridad	800-1000	799-300	0-299
	Válvula de alivio	700-1000	699-300	0-299
	Válvula reductora autorreguladora	800-1000	799-300	0-299
	Disco de ruptura	600-1000	599-200	0-199
	Mirilla	700-1000	699-300	0-299
	Apagallamas	700-1000	699-300	0-299
	TIV – Válvula control lazo temperatura	800-1000	799-300	0-299
	LIV – Válvula control lazo nivel	700-1000	699-300	0-299
	PIV – Válvula control lazo presión	800-1000	799-300	0-299
	FIV – Válvula control lazo caudal	700-1000	699-300	0-299
	WIV - Válvula control lazo peso	700-1000	699-300	0-299
	AIV - Válvula control lazo análisis	800-1000	799-300	0-299
HOV – Válvula automática	800-1000	799-300	0-299	

Tabla 8.10 – Rango NPR en función de tipo de equipos

## 8.4 RESULTADOS

Los resultados de modos de fallos de los 4 tipos de equipos mostrados, se desglosan en el caso de estudio en tres niveles; pero, podría desarrollarse más niveles, aunque no es recomendable más de 3 ya que el nivel de detalle al que se llegaría sería demasiado grande y difícil de gestionar. Estos modos de fallos aunque sean de

diferente naturaleza y nombramiento, se basan en conceptos similares, como son el movimiento o no movimiento de elementos de equipos rotativos, las fugas de varios fluidos, obstrucción u obturación de conductos, rotura de elementos de medida y regulación, etc. Pero, aunque sean conceptos similares la forma en la que aparece un fallo es distinta de un tipo de equipo a otro, diferente es la fuga por el asiento de una válvula que la fuga por el cierre mecánico de una bomba; también es muy importante el tipo de fluido con el que se trabaja, muy diferentes es el impacto en seguridad y medio ambiente del agua en poco volumen que el amoniaco. De ahí la diversidad de modos de fallos y las diferentes valoraciones de NPR.

En la tabla 8.6, se puede observar las diferencias de valoración de frecuencia de fallos, si se desarrollan más escalas según los tipos de equipos. Con ello, se precisa más en la valoración de  $NPR_{MACROSCÓPICO}$ . Las diferentes definiciones de gravedad, con sus valoraciones, de la tabla 8.5, indican un ejemplo de diversidad de impactos potenciales en la industria de procesos.

Para el caso de estudio de  $NPR_{MICROSCÓPICO}$ , los resultados de la gráfica 8.2 indican, que a medida que hay una variación de la variable caudal de trabajo de la bomba centrífuga; se transforma en una variación del  $NPR_{MICROSCÓPICO}$  para el modo de fallo rodamiento deteriorado en la cantidades mostradas tanto en la tabla 8.8 y gráfica 8.2.

La ponderación de NPR, indica que hay multitud de combinaciones posibles para ponderar cada variable del NPR y la selección de cada una es función del entorno industrial y de la valoración que se le dé de 1 a 10.

Los valores de los rangos NPR, son más elevados para tipos de equipos que contienen fluidos explosivos e inflamables, y más bajos para mecanismos donde los fallos tienen impactos menores.

## 8.5 CONCLUSIONES

Una definición y estructuración de modos de fallos, facilita la implantación de RCM, ya que ésta es una de las partes más laboriosas. Se llega a la conclusión que más de 3 niveles de detalle en la definición de modos de fallos, es difícil de trabajar y que dos

niveles también es una buena estructuración para equipos no muy complejos, donde los modos de fallos aparecen de forma visual y no se necesitan medios tecnológicos avanzados para su detección.

Se ha conocido la frecuencia de aparición de modos de fallos en equipos e instalaciones, función de la variabilidad de condiciones de proceso. Se ha planteado un método para ver cómo evoluciona el valor del NPR, función de variación de variables; aplicable a la variación, respecto a la de diseño, del punto de trabajo de un equipo.

Se plantean infinidad de comportamientos físicos y químicos de equipos e instalaciones, donde se puede utilizar la valoración del NPR, función de la dinámica de operatividad.

En el caso de estudio de NPR, se puede observar cómo se parametriza el NPR en función de la variación de una variable y con ello se llega a la conclusión de integrar diferentes situaciones para el desarrollo de AMFEC's; de esta forma, se dispone de un estudio AMFEC en la que su situación de trabajo es variable.

El trabajo futuro de investigación del NPR, es conseguir curvas de fiabilidad de modos de fallos, variando el punto de trabajo del equipo de estudio. De esta manera, se conocerá la frecuencia de aparición del modo de fallo; que será la base de una excelente planificación de mantenimiento, para prevenir los fallos y el camino hacia la optimización de sus costes.

La utilización de las herramientas de ponderación y rango NPR, es decisión del implantador de RCM, el cual se puede ayudar para encontrar mayor precisión en los resultados de NPR de modos de fallos críticos. Si la implantación de RCM, no se realiza en un entorno industrial con grandes impactos causados por sus fallos, estas herramientas pueden ser gratuitas en su utilización, no así en entornos industriales altamente exigentes con la seguridad, medio ambiente y disponibilidad de instalaciones.



# 9

## PLANIFICACIÓN DE MANTENIMIENTO

### 9.1 OBJETIVOS

El presente capítulo tiene por objetivo mostrar la forma lógica y ordenada, de las actividades en mantenimiento que se deben realizar en la implantación de la mejora del método RCM. Para ello, se cuenta con las matrices de decisiones, que son el reflejo de las decisiones que se han tomado al definir las actividades idóneas, para cada activo de cada instalación, en función de su criticidad y necesidad.

Las actividades de mantenimiento a realizar, deben estar ordenadas por criticidad de los activos de estudio y por tipologías de mantenimiento; la información contenida será la frecuencia de actuación de cada actividad, que será función de la criticidad del activo y vendrá definido por la criticidad del NPR de los modos de fallos que aparezcan en dicho activo. Este sistema de información, es el llamado Plan Estratégico de Mantenimiento.

Una vez definido el Plan Estratégico de Mantenimiento, se deben extraer de él las rutas de Mantenimiento Preventivo, por frecuencias, plantas, tipologías de mantenimiento y especialidades. Si interesa alguna estructuración más se puede definir, como por ejemplo actividades para inspección legal de aparatos a presión o baja tensión.

Para poder realizar gestión económica acerca de la planificación diseñada, se deben cuantificar las rutas de Mantenimiento Preventivo, actividad por actividad. Este apartado tiene como objetivo cuantificar económicamente las rutas por plantas y tipologías de equipo. Esta herramienta es la que se utiliza para compararla con los presupuestos asignados a cada área y realizar los ajustes oportunos.

## **9.2 MATRIZ DE DECISIONES**

El presente subcapítulo indica la definición de la matriz de decisiones, haciendo referencia al capítulo 4, donde se ha definido y mostrado ejemplos. Ver en capítulo 4, apartado 4.3.7; figura 4.1 y tablas 4.7a, 4.7b, 4.7c y 4.7d.

Aunque no se indique nada más en este subcapítulo, es necesario estructurarlo de esta forma, para establecer las bases de la aportación del presente capítulo.

## **9.3 PLAN ESTRATÉGICO DE MANTENIMIENTO**

Una vez se han analizado las causas y efectos de las causas de fallos provocados en máquinas e instalaciones y ponderado el riesgo, se debe realizar un plan estratégico para prevenir dichas causas y reducir así la probabilidad de provocar esas causas de fallos que derivan en efectos no deseados. Lo que se pretende es prevenir el efecto y que las repercusiones a la seguridad, medio ambiente, calidad del producto, indisponibilidad de instalaciones por paradas de máquinas (producción) y mantenimiento realizado, sean las mínimas. Con todo ello, una buena implantación del sistema descrito lleva a una reducción de costes, que es la base de la filosofía de la implantación del Mantenimiento Proactivo.

### **9.3.1 DEFINICIÓN**

El plan estratégico de mantenimiento se divide en tres niveles:

- 1- Tipo de mantenimiento
- 2- Especialidad
- 3- Intervención

En las series 9.1, 9.2 y 9.3 se definen los tipos de mantenimiento, las especialidades y las intervenciones, respectivamente, del plan estratégico de mantenimiento.

$$\left\{ M_1^E, M_2^E, \dots, M_\varphi^E, \dots, M_\Gamma^E \right\} \quad (9.1)$$

Siendo:

- $M_\varphi^E$  : Tipo de mantenimiento aplicado en los sistemas de todos los niveles susceptibles de aplicar RCM.
- $\varphi$  : Número de tipo de mantenimiento.
- $\Gamma$  : Cantidad de tipos de mantenimiento.

$$\left\{ E_1^E, E_2^E, \dots, E_\kappa^E, \dots, E_K^E \right\} \quad (9.2)$$

Siendo:

- $E_\kappa^E$  : Especialidad aplicada en los sistemas de todos los niveles susceptibles de aplicar RCM.
- $\kappa$  : Número de especialidad.
- $K$  : Cantidad de especialidades.

$$\left\{ I_1^E, I_2^E, \dots, I_\lambda^E, \dots, I_\Lambda^E \right\} \quad (9.3)$$

Siendo:

- $I_\lambda^E$  : Intervención aplicada en los sistemas de todos los niveles susceptibles de aplicar RCM.
- $\lambda$  : Número de intervención.
- $\Lambda$  : Cantidad de intervenciones.

Las frecuencias de intervención pueden ser infinitas; pero, para poder trabajar de forma más cómoda y concreta, se define una cantidad finita de frecuencias de intervención. Por ello, en la serie 9.4 se define la frecuencia de intervención para el plan estratégico de mantenimiento.

$$\left\{ F_1^E, F_2^E, \dots, F_\nu^E, \dots, F_N^E \right\} \quad (9.4)$$

Siendo:

- $F_\nu^E$  : Tipo de frecuencias de intervención aplicado en los sistemas de todos los niveles susceptibles de aplicar RCM.
- $\nu$  : Número de frecuencia de intervención.
- $N$  : Cantidad de frecuencias de intervención.

### 9.3.2 CASO DE ESTUDIO

Las Tablas 9.1, 9.2 y 9.3 muestran planes de mantenimiento para diferentes criticidades del NPR de modos de fallos. Las tablas están divididas por tipos de mantenimientos (diferentes tipos preventivos), en cada uno de los cuales se tipifican las intervenciones que se pueden realizar y según corresponda a cada máquina se indica con un número y una letra que indican la frecuencia de actuación. Esta simbología representa:

- D = día
- S = semana
- M = mes
- A = año
- V = variable, no sujeto a periodicidad

El número indica la cantidad de periodos temporales definidos por letras, que deben transcurrir entre cada intervención de mantenimiento. Por tanto, se tiene que por ejemplo 6M, se realiza una actuación cada 6 meses.

Se debe indicar que las tablas son el reflejo de la actuación que se debe realizar para valores de NPR críticos, siendo menores las intervenciones para equipos de criticidad normales o poco importantes.

- E: Eléctrico
- I: Instrumentación
- Insp.: Inspección
- Rev.: Revisión

PLAN ESTRATÉGICO DE MANTENIMIENTO PARA MODOS DE FALLOS CON NPR CRÍTICO

TIPO DE MANTENIMIENTO	INTERVENCIÓN	MÁQUINAS ROTATIVAS						INTERCAMBIO CALOR						DEPÓSITOS										
		Soplante	Ventilador	Agitador	Mezclador	Bomba	Compresor	Bombas de vacío	Intercambiador de Calor	Condensador	Reboiler	Torre Refrigeración	Caldera Acetate	Caldera Vapor	Frigorífica	Climatizador	Columna Destilación	Scrubber	Tanques	Reactor	Recipiente	Tolva	Demister	
MANTENIMIENTO PREDICTIVO	E	Medición del aislamiento del devanado	6M	6M	6M	6M	4M	4M	6M															
		Verificar consumo eléctrico	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M															
		Análisis amplitud de impulsos de choque	2M		2M		2M	2M																
		Análisis amplitud de vibraciones	2M	2M	2M	2M	2M	2M																
		Análisis frecuencial de vibraciones			4M		4M	4M																
		Análisis de aceite	3M		3M		3M	3M	3M															
		Comprobación presión manómetro	1M				1M	1M	1M	1M	1M	1M							1M	1M	1M	1M	1M	1M
		Ferografía en análisis de aceite			6M			6M																
		Medición consumo	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M															
		Medición de temperatura			3M		3M			2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M
	Medición del salto térmico			3M		3M			2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	
MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR INSPECCIÓN	I	Inspección según ruta de calibraciones																						
		Alineación ejes	6M				4M	6M	6M															
		Análisis de aceite			6M		4M	6M																
		Chequeo actuación válvula								3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M
		Comprobar presión manómetro	1M				1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M
		Comprobar temperatura			3M		3M			3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M
		Equilibrado del rodete					2A																	
		Inspección auditiva de ruidos	1S	1S	1S	1S	1S	1S	1S					1S		1S	1S							
		Inspección estroboscópica		6M	4M																			
		Inspección por ultrasonidos								4M	4M	6M		5M	5M			5M	5M					
	Inspección presión de sello								6M	6M	6M		6M	6M			6M	6M						
	Lubchecker	2M	3M	1M	3M	1M	1M	1M					2M		2M	2M								
	Medición presión	2S				2S	2S	2S	2S	2S	2S		2S	2S	2S		2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	
	Verificar alineación					3M	3M	3M																
	Verificar estado de rodete					1A																		
	Verificar estado de eje	1A		1A		1A	1A	1A					1A		1A	1A								
	Verificar fugas								2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	
	INSP.	Inspección de condiciones de variables de circuito	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	
		Inspección visual	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	
		Inspección	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	
MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR SUSTITUCIÓN PLANIFICADA	I	Revisar válvulas					2M	2M	2M	2M	2M	2M		2M	2M	2M		2M	2M					
		Limpiar filtros PC																						
		Revisión de lazo																						
		Calibración																						
	E	Revisión según plan de mantenimiento	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M					6M		6M	6M					6M		
		Actividad programada	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
		Cambio aceite							V					V		V								
		Cambio de junta								2A	2A	2A		1A	1A	5A		2A	2A	5A	5A	5A	5A	5A
		Cambio filtro	1A	1A	1A	1A	1A	1A	1A					1A		1A	1A					1A	1A	
		Cambio rodamientos	2A	2A	2A	2A	2A	2A	2A					2A		2A	2A							
	Lubchecker y engrase	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M					2M		2M	2M								
	Lapeado	4A		4A		4A	4A	4A																
	Limpiar y revisar filtro	6M	6M	6M	6M	4M	6M	6M					6M		6M	6M					6M	6M		
	Limpieza	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	
	Poner aislamiento entre dos materiales en contacto												5A		5A	5A				5A				
	Prueba de recipiente a presión								10A	10A	10A		10A	10A	10A		10A	10A			10A	10A		
	Pruebas de aparatos a presión								10A	10A	10A		10A	10A	10A		10A	10A						
	Reapriete								2A	2A	2A		2A	2A	2A		2A	2A		2A	2A		2A	
	Reparación válvula					4A	4A	4A					4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	
	Sustitución del dilatador					10							10A	10A	10A		10A	10A						
	Sustitución del muelle												10A	10A	10A		10A	10A						
	Sustitución en retimbrado												10A	10A	10A		10A	10A					10A	
	Vaciado, limpieza y sustitución de fluido				6M		6M						3A	3A	3A		3A	3A		3A	3A	3A	3A	
	Verificar que haya junta								3A	3A	3A		3A	3A		3A	3A		3A	3A	3A	3A	3A	
	REV.	Revisión en el retimbrado							10A	10A	10A		10A	10A		10A	10A		10A	10A	10A	10A	10A	
		Control de servicios	1D				1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	
		Revisión de un elemento	6M	1A	6M	1A	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	
		Revisión oficial							10A	10A	10A	10A	10A	10A	10A	10A	10A	10A	10A	10A	10A	10A	10A	
		Ruta mensual	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	

Tabla 9.1- Plan estratégico de mantenimiento para NPR crítico

PLAN ESTRATÉGICO DE MANTENIMIENTO PARA MODOS DE FALLOS CON NPR NORMAL

TIPO DE MANTENIMIENTO	INTERVENCIÓN	MÁQUINAS ROTATIVAS						INTERCAMBIO CALOR						DEPÓSITOS												
		Soplante	Ventilador	Agitador	Mezclador	Bombas	Compresores	Bombas de Vacío	Intercambiador de Calor	Condensador	Reboiler	Torre Refrigeración	Caldera Aceite	Caldera Vapor	Frigorífica	Climatizador	Columna	Destilación	Scrubber	Tanques	Reactores	Recipientes	Tolva	Demister		
MANTENIMIENTO PREDICTIVO	<b>MECÁNICO</b>																									
	E	Medición del aislamiento del devanado	6M	6M	6M	6M	4M	4M	6M						6M	4M	6M									
		Verificar consumo eléctrico	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M						3M	3M	3M									
		Análisis amplitud de impulsos de choque	2M		2M		2M	2M							2M	2M	2M									
		Análisis amplitud de vibraciones	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M						2M	2M	2M									
		Análisis frecuencial de vibraciones													2M	2M										
		Análisis de aceite																								
		Comprobación presión manómetro	1M				1M	1M	1M	1M	1M	1M		1M	1M		1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M
		Ferografía en análisis de aceite																								
		Medición consumo	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M						3M	3M	3M									
	Medición de temperatura			3M		3M			2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	
	Medición del salto térmico								2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	
MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR INSPECCIÓN	<b>MECÁNICO</b>																									
	I	Inspección según ruta de calibraciones																								
		Alineación ejes	6M				4M	6M	6M																	
		Análisis de aceite																								
		Chequeo actuación válvula																								
		Comprobar presión manómetro	1M				1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M
		Comprobar temperatura			3M		3M			3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M
		Equilibrado del rodete					2A																			
		Inspección auditiva de ruidos	1S	1S	1S	1S	1S	1S	1S					1S	1S	1S										
		Inspección estroboscópica		6M	4M																					
		Inspección por ultrasonidos								4M	4M	6M	5M	5M		5M	5M									
		Inspección presión de sello								6M	6M	6M	6M	6M		6M	6M									
		Lubchecker	2M	3M	1M	3M	1M	1M	1M					2M	2M											
		Medición presión	2S				2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S
		Verificar alineación																								
	Verificar estado de rodete					1A																				
	Verificar estado de eje	1A		1A		1A	1A	1A					1A		1A	1A										
	Verificar fugas								2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	2S	
MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR SUSTITUCIÓN PLANIFICADA	<b>INSP.</b>																									
	I	Inspección de condiciones de variables	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M
		Inspección visual	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D	4D
		Inspección																								
	<b>MECÁNICO</b>																									
	I	Revisar válvulas					2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M
		Limpiar filtros PC																								
		Revisión de lazo																								
		Calibración																								
	<b>E</b>	Revisión según plan de mantenimiento	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M						6M	6M	6M									
		Actividad programada	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
		Cambio aceite													V	V	V									
		Cambio de junta								2A	2A	2A	1A	1A	5A	2A	2A	5A	5A	5A	5A	5A	5A	5A	5A	5A
		Cambio filtro																								
		Cambio rodamientos	2A	2A	2A	2A	2A	2A	2A					2A	2A	2A										
	Lubchecker y engrase	2M	2M	2M	2M	2M	2M	2M					2M	2M	2M											
	Lapeado																									
<b>MECÁNICO</b>																										
	Limpiar y revisar filtro																									
	Limpieza								3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	
	Poner aislamiento entre dos materiales								5A			5A	5A				5A									
	Prueba de recipiente a presión								10A	10	10	10	10	10	10	10	10	10						10		
	Pruebas de aparatos a presión								10A	10	10	10	10	10	10	10	10	10								
	Reapriete								2A	2A	2A	2A	2A	2A	2A	2A	2A	2A						2A		
	Reparación válvula					4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A	4A								
	Sustitución del dilatador	10				10	10		10A	10	10															
	Sustitución del muelle																									
	Sustitución en retimbrado								10A	10	10	10	10	10	10	10	10	10						10		
	Vaciado, limpieza y sustitución de fluido			6M		6M																				
	Verificar que haya junta																									
<b>REV.</b>																										
	Revisión en el retimbrado					1D	1D	1D	10A	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
	Control de servicios	1D							1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D	1D						1D		
	Revisión de un elemento	6M	1A	6M	1A	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	6M	
	Revisión oficial								10A	10	10	10	10	10	10	10	10	10						10		
	Ruta mensual	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	1M	

Tabla 9.2- Plan estratégico de mantenimiento para NPR normal

TIPO DE MANTENIMIENTO		PLAN ESTRATÉGICO DE MANTENIMIENTO PARA MODOS DE FALLOS CON NPR POCO IMPORTANTE																							
		MÁQUINAS ROTATIVAS								INTERCAMBIO CALOR						DEPÓSITOS									
		Soplante	Ventilador	Agitador	Mezclador	Bombas	Compresores	Bombas de Vacío	Intercambiador de Calor	Condensador	Reboiler	Torre Refrigeración	Caldera Aceite	Caldera Vapor	Frigorífica	Climatizador	Columna	Destilación	Scrubber	Tanques	Reactores	Recipientes	Tolva	Demister	
MANTENIMIENTO PREDICTIVO	E	Medición del aislamiento del devanado																							
	MECÁNICO	Verificar consumo eléctrico																							
MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR INSPECCIÓN	MECÁNICO	Análisis amplitud de impulsos de choque																							
		Análisis amplitud de vibraciones																							
		Análisis frecuencial de vibraciones																							
		Análisis de aceite																							
		Comprobación presión manómetro																							
		Ferrografía en análisis de aceite																							
		Medición consumo																							
		Medición de temperatura																							
		Medición del salto térmico																							
		MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR INSPECCIÓN	MECÁNICO	Inspección según ruta de calibraciones																					
Alineación ejes																									
Análisis de aceite																									
Chequeo actuación válvula																									
Comprobar presión manómetro																									
Comprobar temperatura																									
Equilibrado del rodete																									
Inspección auditiva de ruidos																									
Inspección estroboscópica																									
Inspección por ultrasonidos																									
MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR INSPECCIÓN	INSP.	Inspección presión de sello																							
		Lubchecker																							
		Medición presión																							
		Verificar alineación																							
		Verificar estado de rodete																							
		Verificar estado de eje																							
		Verificar fugas																							
		Inspección de condiciones de variables																							
		Inspección visual																							
		Inspección																							
MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR SUSTITUCIÓN PLANIFICADA	MECÁNICO	Revisar válvulas																							
		Limpiar filtros PC																							
		Revisión de lazo																							
		Calibración																							
		Revisión según plan de mantenimiento																							
		Actividad programada																							
		Cambio aceite																							
		Cambio de junta																							
		Cambio filtro																							
		Cambio rodamientos																							
Lubchecker y engrase																									
MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR SUSTITUCIÓN PLANIFICADA	REV.	Lapeado																							
		Limpiar y revisar filtro																							
		Limpieza																							
		Poner aislamiento entre dos materiales																							
		Prueba de recipiente a presión																							
		Pruebas de aparatos a presión																							
		Reapriete																							
		Reparación válvula																							
		Sustitución del dilatador																							
		Sustitución del muelle																							
Sustitución en retimbrado																									
Vaciado, limpieza y sustitución de fluido																									
Verificar que haya junta																									
Revisión en el retimbrado																									
Control de servicios																									
Revisión de un elemento																									
Revisión oficial																									
Ruta mensual																									

Tabla 9.3- Plan estratégico de mantenimiento para NPR poco importante

## 9.4 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

### 9.4.1 DEFINICIÓN

El siguiente paso es desglosar las actuaciones de mantenimiento por grupos de frecuencias similares. Así, se podrán realizar rutas según la misma frecuencia y para

la misma planta. La idea es optimizar el tiempo en que un oficial (ya sea mecánico, eléctrico, instrumentista o de sistemas), que está en una de las plantas del centro industrial o productivo donde trabaje; por ello, el tiempo efectivo del oficial se verá incrementado considerablemente, al no tener que desplazarse de planta para realizar las actuaciones diarias que le acontece.

En la planificación anual se debe agrupar muy claramente las rutas que coinciden en fechas. Si se parte de la semana 1 del año, en la semana 4 se debe agrupar la ruta semanal más la primera ruta mensual, las dos para la misma planta; en la semana 26 (6 meses), se agrupa la ruta semanal, la mensual, la bimestral, la trimestral y la semestral. Las rutas surgidas generarán una cantidad de grupos por solapamiento de fechas de actuación.

Las rutas también se pueden realizar por tipos de equipos, por tipos de intervención, por criticidad de equipos, etc. Hay multitud de combinaciones que se pueden realizar, en función de la combinación de las variables que se quieran manejar. Es a criterio de la estrategia del departamento de mantenimiento, elegir una combinación u otra, con el objetivo de realizar un mayor análisis en una variable u otra, para poder tener una reducción de costes en las actuaciones de mantenimiento, que es el objetivo principal de toda la implantación.

## 9.4.2 CÁLCULO DE COSTES

El punto donde se deben centrar todos los esfuerzos por mejorar de forma continua la actuación de mantenimiento es en la reducción de su coste. A continuación, se muestra el cálculo realizado para obtener los costes de mantenimiento en función de cada intervención.

La ecuación 9.5 muestra el coste de Mantenimiento Preventivo por plantas.

$$C_{TP}^{MP} = \sum_{\theta=1}^{\Theta} \sum_{o=1}^{\Omega} C_{P}^{MP} \cdot F_o^A \quad (9.5)$$

Donde:

- $C_{TP}^{MP}$  : Coste total de Mantenimiento Preventivo por plantas.

- $O$  : Cantidad de frecuencias de actuación (semanal, mensual, bimestral, trimestral, etc.).
- $\Theta$  : Cantidad de plantas.
- $o$  : Número de frecuencia de actuación (semanal, mensual, bimestral, trimestral, etc.).
- $\theta$  : Número de plantas.
- $F_o^A$  : Número de actuaciones anuales por frecuencia (ej. hay 365 actuaciones anuales de la frecuencia diaria y 0,2 de la frecuencia quinquenal).
- $C_P^{MP}$  : Coste de la ruta de Mantenimiento Preventivo de una frecuencia y planta dada. Se calcula con la ecuación 9.6.

$$C_P^{MP} = \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( C_I^{MP} \cdot \sum_{\rho=1}^P E_{\rho\sigma}^{MP} \right) \quad (9.6)$$

Siendo:

- $P$  : Cantidad de equipos por planta.
- $\Sigma$  : Cantidad de intervenciones de Mantenimiento Preventivo.
- $\rho$  : Número de equipo por planta.
- $\sigma$  : Número de intervención de Mantenimiento Preventivo.
- $C_I^{MP}$  : Coste de intervención. Ver ecuación 9.14.
- $E_{\rho\sigma}^{MP}$  : Valor 0 o 1 en el caso que para la intervención y el equipo dado no se deba o si se deba actuar, respectivamente.

Sustituyendo 9.6 en 9.5, queda el coste total por plantas en la ecuación 9.7.

$$C_{TP}^{MP} = \sum_{\theta=1}^{\Theta} \sum_{o=1}^O \left( \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( C_I^{MP} \cdot \sum_{\rho=1}^P E_{\rho\sigma}^{MP} \right) \right)_{o\theta} \cdot F_o^A \quad (9.7)$$

Para llegar a conocer el coste anual de Mantenimiento Preventivo del centro industrial o productivo donde se implanta, a través de las rutas por tipos de equipos, se debe consultar la ecuación 9.8.

$$C_{TE}^{MP} = \sum_{\tau=1}^T \sum_{o=1}^O \left( C_{E \sigma \tau}^{MP} \right) \cdot F_o^A \quad (9.8)$$

Donde:

- $C_{TE}^{MP}$  : Coste total de Mantenimiento Preventivo por tipo de equipos.
- $O$ : Cantidad de frecuencias de actuación (semanal, mensual, bimestral, trimestral, etc.).
- $T$ : Cantidad de tipos de equipos.
- $o$ : Número de frecuencia de actuación (semanal, mensual, bimestral, trimestral, etc.).
- $\tau$ : Número de tipo de equipo.
- $F_o^A$ : Número de actuaciones anuales por frecuencia (ej. hay 365 actuaciones anuales de la frecuencia diaria y 0,2 de la frecuencia quinquenal).
- $C_{E \sigma \tau}^{MP}$ : Coste de la ruta de Mantenimiento Preventivo de una frecuencia y tipo de equipo dado. Se calcula con la ecuación 9.9.

$$C_{E \sigma \tau}^{MP} = \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( C_{I \sigma}^{MP} \cdot \sum_{\nu=1}^Y E_{\sigma \nu}^{MP} \right) \quad (9.9)$$

Siendo:

$Y$ : Cantidad de equipos por tipos de equipo.

$\nu$ : Número de equipo por tipos de equipo.

Sustituyendo 9.9 en 9.8, queda el coste total por plantas en la ecuación 9.10.

$$C_{TE}^{MP} = \sum_{\tau=1}^T \sum_{o=1}^O \left( \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( C_{I \sigma}^{MP} \cdot \sum_{\nu=1}^Y E_{\sigma \nu}^{MP} \right) \right) \cdot F_o^A \quad (9.10)$$

Las dos formas de calcular el coste anual de Mantenimiento Preventivo dan el mismo resultado, pero por caminos diferentes. Si las rutas por plantas y por tipos de equipos

se quieren combinar, para reducir el tamaño de la ruta y posteriormente se quiere calcular el coste anual, se debe utilizar la ecuación 9.11.

$$C_{TPE}^{MP} = \sum_{\tau=1}^T \sum_{\theta=1}^{\Theta} \sum_{o=1}^O \left( C_{PE}^{MP} \right)_{\theta\tau} \cdot F_o^A \quad (9.11)$$

Donde:

$$\left( C_{PE}^{MP} \right)_{\theta\tau} = \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( \left( C_I^{MP} \right)_{\sigma} \cdot \sum_{\omega=1}^{\Omega} E_{\sigma\omega}^{MP} \right) \quad (9.12)$$

Siendo

- $\Omega$  : Cantidad de equipos por tipo de equipo y planta.
- $\omega$  : Número de equipo por tipo de equipo y planta.

Sustituyendo 9.12 en 9.11, resulta la ecuación 9.13 combinación de costes de Mantenimiento Preventivo por plantas y tipos de equipos.

$$C_{TPE}^{MP} = \sum_{\tau=1}^T \sum_{\theta=1}^{\Theta} \sum_{o=1}^O \left( \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( \left( C_I^{MP} \right)_{\sigma} \cdot \sum_{\omega=1}^{\Omega} E_{\sigma\omega}^{MP} \right) \right)_{\theta\tau} \cdot F_o^A \quad (9.13)$$

### 9.4.3 CASO DE ESTUDIO

En la tabla 9.4 se muestra un ejemplo de ruta de Mantenimiento Preventivo por plantas, en este caso la planta es la 1 y la frecuencia 3 meses. Pero deben existir tantas rutas como frecuencias y plantas se haya definido en el plan de mantenimiento Preventivo del centro industrial o productivo donde se esté implantando. Por tanto, el número de rutas es  $R = N \cdot T$ .

Siendo:

- R = Número de rutas del Plan de Mantenimiento Preventivo del centro industrial o productivo
- N= Número de frecuencias definidas
- T= Número de plantas del centro industrial o productivo

Para el ejemplo con el cual se trabaja, y que servirá para establecer las bases de cálculo de costes, existen 16 frecuencias y 25 plantas. Por tanto, el número de rutas es  $400 = 16 \times 25$ .

La ruta indicada en la tabla 9.4, indica las actividades a realizar dentro de dicha ruta. Las casillas correspondientes a las actividades para los equipos dados marcados con 1, indica que se debe realizar, las marcadas con 0 indica que se deben omitir. Dicha ruta no es la orden de trabajo con las indicaciones a poner en caso para realizar las actividades; es la parte del Plan Estratégico de Mantenimiento correspondiente a una frecuencia dada, en este caso 3 meses. Dicho de otro modo, las personas encargadas de realizar la ruta, llevarán consigo el listado de actividades a realizar por cada intervención.

RUTA POR PLANTAS CON FRECUENCIA 3 MESES

PLANTA	MATRÍCULA	MANTENIMIENTO PREDICTIVO								MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR INSPECCIÓN																							
		E		MECÁNICO						I	MECÁNICO								INSP.														
		Medición del aislamiento del devanado	Verificar consumo eléctrico	Análisis amplitud de impulsos de choque	Análisis amplitud de vibraciones	Análisis frecuencial de vibraciones	Análisis de aceite	Comprobación presión manómetro	Ferografía en análisis de aceite	Medición consumo	Medición de temperatura	Medición del salto térmico	Inspección según ruta de calibraciones	Alineación ejes	Análisis de aceite	Chequeo actuación válvula	Comprobar presión manómetro	Comprobar temperatura	Equilibrado del rodete	Inspección auditiva de ruidos	Inspección estroboscópica	Inspección por ultrasonidos	Inspección presión de sello	Lubchecker	Medición presión	Verificar alineación	Verificar estado de rodete	Verificar estado de eje	Verificar fugas	Inspección condiciones variables de circuito	Inspección visual		
1	C-001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	C-002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
1	E-001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
1	E-002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
1	E-003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
1	E-004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	E-005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	E-012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
1	F-001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	FI-001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
1	FI-002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	FI-003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	FI-004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
1	FI-005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	LI-001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
1	LI-002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	LI-003	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	
1	P-001	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	
1	P-002	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	
1	P-003	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	
1	P-004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	P-005	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	
1	P-006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	P-007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	P-012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
1	PI-001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	PI-002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	PI-003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1	TI-001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	TI-002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	TR-001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	TR-002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	TR-003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	TR-004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1	V-001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	V-002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	V-003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 9.4- Ruta de mantenimiento preventivo con frecuencia 3 meses

El coste de cada intervención de Mantenimiento Preventivo por equipo se puede ver en la ecuación 9.14.

$$C_{I, \varnothing}^{MP} = C_{I, \varnothing}^{MP} \cdot n_{I, \varnothing}^{MP} \cdot C_{I, \varnothing}^{MP} + C_{I, \varnothing}^{MP} + C_{I, \varnothing}^{MP} + C_{I, \varnothing}^{MP} \quad (9.14)$$

Siendo:

- $C_I^{MP}$ : Coste de intervención en €.
- $T_I^{MP}$ : Tiempo de intervención en horas.
- $C_{l_I}^{MP}$ : Coste mano de obra en €/hora.
- $N_I^{MP}$ : Número de personas en unidades.
- $C_{H_I}^{MP}$ : Coste de las herramientas empleadas en la intervención en €.
- $C_{C_I}^{MP}$ : Coste de los consumibles (tornillos, juntas, arandelas, conectores, etc.) utilizados en la intervención en €.
- $C_{S_I}^{MP}$ : Coste de los servicios utilizados por intervención en €.

Se muestra en las tablas 9.5a y 9.5b los costes de cada intervención de Mantenimiento Preventivo.

La tabla 9.6 muestra los costes de mantenimiento por frecuencia y planta. A modo de muestra, solo se observan en la tabla 9.6 5 de las 25 plantas del caso de estudio. Para llegar a conocer el coste anual de Mantenimiento Preventivo del centro industrial o productivo donde se implanta, a través de las rutas por plantas, se debe consultar la ecuación 9.13.

La tabla 9.7 muestra los costes de mantenimiento por frecuencia y tipos de equipo.

COSTES DE INTERVENCIONES POR EQUIPO										
INTERVENCIÓN		TIEMPO (h)	MANO DE OBRA €/h	Nº PERSONAS	MANO DE OBRA (€)	HERRAMIENTAS (€)	CONSUMIBLES (€)	SERVICIOS (€)	TOTAL(€)	
MANTENIMIENTO PREDICTIVO	E	Medición del aislamiento del devanado	0,5	25	1	12,5	0	0	0	12,5
		Verificar consumo eléctrico	0,5	25	1	12,5	0	0	0	12,5
	MECÁNICO	Análisis amplitud de impulsos de choque)	0,6	25	2	30	0	0	0	30
		Análisis amplitud de vibraciones	0,6	25	2	30	0	0	0	30
		Análisis frecuencial de vibraciones	1,5	25	2	75	0	0	0	75
		Análisis de aceite	0,5	25	1	12,5	0	0	200	212,5
		Comprobación presión manómetro	0,3	25	1	7,5	0	0	0	7,5
		Ferrografía en análisis de aceite	0,5	25	1	12,5	0	0	400	412,5
		Medición consumo	0,4	25	1	10	0	0	0	10
		Medición de temperatura	0,2	25	1	5	0	0	0	5
Medición del salto térmico	0,2	25	1	5	0	0	0	5		
MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR INSPECCIÓN	MECÁNICO	I Inspección según ruta de calibraciones	0,3	25	1	7,5	0	0	5	12,5
		Alineación ejes	2	25	2	100	0	0	0	100
		Análisis de aceite	0,5	25	1	12,5	0	0	200	212,5
		Chequeo actuación válvula	0,7	25	2	35	0	0	0	35
		Comprobar presión manómetro	0,3	25	1	7,5	0	0	0	7,5
		Comprobar temperatura	0,2	25	1	5	0	0	0	5
		Equilibrado del rodete	2	25	2	100	0	0	600	700
		Inspección auditiva de ruidos	0,2	25	1	5	0	0	0	5
		Inspección estroboscópica	0,8	25	1	20	0	0	0	20
		Inspección por ultrasonidos	1	25	1	25	0	0	0	25
	INSP.	Inspección presión de sello	0,6	25	1	15	0	0	0	15
		Lubchecker	0,5	25	1	12,5	0	0	0	12,5
		Medición presión	0,2	25	1	5	0	0	0	5
		Verificar alineación	1,5	25	2	75	0	0	0	75
		Verificar estado de rodete	2	25	2	100	0	0	0	100
		Verificar estado de eje	3	25	2	150	0	0	0	150
		Verificar fugas	1	25	1	25	0	0	0	25
		Inspección condiciones variables circuito	0,1	25	2	5	0	0	0	5
		Inspección visual	0,1	25	1	2,5	0	0	0	2,5
		Inspección	0,2	25	1	5	0	0	0	5

Tabla 9.5a- Costes de intervenciones por equipo

		<b>COSTES DE INTERVENCIONES POR EQUIPO</b>							
		<b>TIEMPO (h)</b>	<b>MANO DE OBRA €/h</b>		<b>MANO DE OBRA (€)</b>	<b>HERRAMIENTAS (€)</b>	<b>CONSUMIBLES (€)</b>	<b>SERVICIOS (€)</b>	<b>TOTAL(€)</b>
<b>INTERVENCIÓN</b>			<b>Nº PERSONAS</b>						
<b>I</b>	Revisar válvulas	0,5	25	1	12,5	0	0	10	22,5
	Limpiar filtros PC	0,5	25	2	25	0	0	10	35
	Revisión de lazo	0,7	25	2	35	0	0	10	45
	Calibración	1	25	2	50	0	0	20	70
<b>E</b>	Revisión según plan de mantenimiento eléctrico	1	25	2	50	0	0	0	50
	Actividad programada	1	25	1	25	0	0	0	25
	Cambio aceite	0,5	25	1	12,5	0	60	0	72,5
	Cambio de junta	1	25	2	50	0	20	0	70
	Cambio filtro	1	25	2	50	0	10	0	60
	Cambio rodamientos	0,5	25	2	25	0	30	0	55
	Lubchecker y engrase	1	25	1	25	0	20	0	45
	Lapeado	2	25	2	100	0	0	400	500
	Limpiar y revisar filtro	1	25	2	50	0	20	0	70
	Limpieza	1	25	2	50	0	0	0	50
	Poner aislamiento entre dos materiales en contacto	2	25	2	100	0	60	0	160
	Prueba de recipiente a presión	15	25	4	1.500	0	1.200	1.200	3.900
	Pruebas de aparatos a presión	15	25	4	1.500	0	1.200	1.200	3.900
	Reapriete	4	25	3	300	0	0	0	300
	Reparación válvula	2	25	2	100	0	0	100	200
	Sustitución del dilatador	6	25	2	300	0	2.000	0	2.300
	Sustitución del muelle	4	25	2	200	0	200	0	400
	Sustitución en retimbrado	8	25	3	600	0	1.500	0	2.100
	Vaciado, limpieza y sustitución de fluido barrera	1	25	1	25	0	40	0	65
	Verificar que haya junta	1,5	25	2	75	0	0	0	75
<b>REV.</b>	Revisión en el retimbrado	15	25	2	750	0	0	250	1.000
	Control de servicios	0,1	25	2	5	0	0	0	5
	Revisión de un elemento	1	25	1	25	0	0	0	25
	Revisión oficial	15	25	2	750	0	0	0	750
	Ruta mensual	0,5	25	2	25	0	0	0	25

Tabla 9.5b- Costes de intervenciones por equipo

## COSTE DE MANTENIMIENTO POR PLANTAS

Nº ORDEN	FRECUENCIA DE ACTUACIÓN	COSTE UNITARIO (€)	FRECUENCIA ANUAL	COSTE (€) ANUAL	COSTE (€) PLANTA-1	COSTE (€) PLANTA-2	COSTE (€) PLANTA-3	COSTE (€) PLANTA-4	COSTE (€) PLANTA-5
1	1D	2.020	365,0	737.300	20.075	12.775	14.600	78.475	38.325
2	4D	1.323	91,25	120.678	3.650	1.825	2.509	15.513	8.441
3	1S	775	52,00	40.300	1.300	0	780	3.380	1.820
4	2S	9.100	26,00	236.600	5.460	5.460	4.290	26.910	12.220
5	1M	20.788	12,00	249.450	7.620	3.660	5.040	30.420	16.200
6	2M	24.728	6,00	148.365	4.995	1.665	3.210	14.535	8.235
7	3M	80.780	4,00	323.120	10.900	3.260	6.740	34.170	19.590
8	4M	29.343	3,00	85.185	4.163	150	1.695	8.535	5.708
9	5M	1.205	2,40	2.892	60	228	60	492	204
10	6M	87.833	2,00	175.665	5.185	1.110	3.285	17.985	10.025
11	8M	163	1,50	244	0	38	0	56	19
12	1A	44.700	1,00	44.700	1.683	13	998	3.990	2.440
13	2A	164.880	0,50	82.440	2.928	910	1.603	8.770	4.795
14	3A	20.400	0,33	6.799	150	175	125	775	350
15	5A	38.850	0,20	7.770	206	184	188	892	496
16	10A	2.795.200	0,10	279.520	9.045	5.810	6.420	34.950	16.375
17	V	14.168	0,00	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>				<b>2.541.028 €</b>	<b>77.418 €</b>	<b>37.262 €</b>	<b>51.542 €</b>	<b>279.848 €</b>	<b>145.242 €</b>

Tabla 9.6- Costes de mantenimiento por frecuencia y planta

## COSTE DE MANTENIMIENTO POR TIPOS DE EQUIPO

Nº DE ORDEN	FRECUENCIA DE ACTUACIÓN	COSTE UNITARIO (€)	FRECUENCIA ANUAL	COSTE (€) ANUAL	COSTE (€) MÁQUINAS ROTATIVAS	COSTE (€) INTERCAMBIO DE CALOR	COSTE (€) DEPÓSITOS	COSTE (€) TRANSPORTES	COSTE (€) VALVULARIA	COSTE (€) AUXILIARES	COSTE (€) MÁQUINAS DE SERVICIO	COSTE (€) INDICADORES DE VARIABLES DE ESTADO	COSTE (€) VALVULAS CONTROLADORAS
1	1D	2.020	365,0	737.300	184.325	131.400	330.325	12.775	0	20.075	18.250	40.150	0
2	4D	1.323	91,25	120.678	27.603	17.109	41.519	1.597	228	4.106	2.966	25.322	228
3	1S	775	52,00	40.300	28.600	2.600	1.300	780	260	1.300	2.600	2.860	0
4	2S	9.100	26,00	236.600	17.030	54.600	137.410	3.120	0	9.750	910	13.780	0
5	1M	20.788	12,00	249.450	71.280	34.800	86.820	2.820	300	7.890	4.830	40.410	300
6	2M	24.728	6,00	148.365	82.395	20.010	24.375	2.355	450	5.640	3.570	9.570	0
7	3M	80.780	4,00	323.120	163.380	29.950	71.230	2.510	360	11.150	8.000	36.300	240
8	4M	28.395	3,00	85.185	76.523	1.080	0	0	0	1.290	773	5.520	0
9	5M	1.205	2,40	2.892	348	1.260	84	72	0	876	60	192	0
10	6M	87.833	2,00	175.665	90.440	19.470	21.545	3.555	315	9.245	4.240	26.655	200
11	8M	163	1,50	244	0	0	19	56	0	113	0	56	0
12	1A	44.700	1,00	44.700	32.670	3.238	1.063	430	85	1.430	2.088	3.685	13
13	2A	164.880	0,50	82.440	36.830	12.045	26.415	683	28	973	810	4.658	0
14	3A	20.400	0,33	6.799	125	1.550	4.400	100	0	325	25	275	0
15	5A	38.850	0,20	7.770	28	1.660	5.248	198	0	254	0	382	0
16	10A	2.795.200	0,10	279.520	26.485	87.300	135.930	3.100	0	5.120	1.700	19.810	75
17	V	14.168	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>				<b>2.541.028 €</b>	<b>838.062 €</b>	<b>418.072 €</b>	<b>887.682 €</b>	<b>34.151 €</b>	<b>2.026 €</b>	<b>79.536 €</b>	<b>50.821 €</b>	<b>229.625 €</b>	<b>1.056 €</b>

Tabla 9.7- Costes de mantenimiento tipos de equipo

Una vez calculados los costes directos e indirectos de cada intervención, se calculan los costes por frecuencia y planta, multiplicando cada coste de cada intervención por la cantidad de veces que aparecen en un año. Con lo que la tabla 9.6 indica los costes de frecuencias y plantas para la intervención de un año del plan de mantenimiento. Del

mismo modo, la tabla 9.7 indica los costes de las frecuencias de intervención por tipos de equipos, para el plan de mantenimiento de un año también.

## 9.5 RESULTADOS

Cada una de las tablas 9.1, 9.2 y 9.3 del Plan Estratégico de Mantenimiento para NPR crítico, normal y poco importante, tienen una intensidad de recursos aportados para realizar mantenimiento en los tipos de equipos definidos. La intensidad de recursos, se transforma en frecuencia de actuación y complejidad tecnológica de los aparatos de medida. Por tanto, se observa que en el NPR crítico se verifica el consumo eléctrico de bombas cada 3 meses; en cambio, en NPR poco importante ni tan solo se verifica el consumo eléctrico.

En las tablas 9.5a y 9.5b, algunas de las actividades tienen una parte económica que no es proporcional a las horas de intervención, ya que son servicios especializados subcontratados o necesitan de materiales para su intervención. Los costes totales resultantes, son los directos e indirectos que intervienen en cada actividad; por ello, en el cálculo de costes por plantas y frecuencias de actuación, se pueden comparar directamente con los presupuestos asignados.

En la tabla 9.7, se observa como la frecuencia más cara es la diaria, ya que tiene muchas repeticiones durante el año, aunque no tenga unos costes de intervención muy elevados. Las intervenciones son de tipo revisión de valores de procesos, como temperatura o presión, de forma visual. Las frecuencias de una semana a 6 meses, son del tipo más tecnológicas con una media coste intervención un poco más elevada que el tipo diario. Pero las intervenciones más caras son las de frecuencias muy bajas; o sea, periodo muy alto, 5 años y 10 años. Se atribuyen a revisiones de ámbito legal regidas por el Ministerio de Industria.

## 9.6 CONCLUSIONES

Las conclusiones que se extraen del capítulo, es para que el plan de mantenimiento se pueda organizar, se debe partir de las actividades que se han determinado en la matriz de decisiones y separarlas según la criticidad del NPR. De este modo, se agrupa

frecuencias de intervención de actividades de mantenimiento por criticidad de NPR en cada uno de los activos de estudio.

La extracción de las rutas por frecuencias y plantas del Plan Estratégico de Mantenimiento, es clave para su distribución entre los encargados de su ejecución; así como, para su cuantificación económica. Dividir las actividades de mantenimiento en mano de obra, materiales y servicios externos, hace que se disponga de la totalidad de los costes directos e indirectos, necesario para la comparación de los presupuestos asignados con los costes del plan.

Esta forma de planificar el mantenimiento de un centro industrial o productivo, es la forma en la que se implanta en la presente investigación, no descartando que haya otras formas de planificar el mantenimiento; pero, dentro del contexto de la mejora de la metodología RCM, es la más idónea.

## 10

# INDICADORES DE GESTIÓN

## 10.1 OBJETIVOS

Los objetivos se basan en la definición de una manera de extracción de información de incidencias de mantenimiento, a través de bases de datos de incidencias de mantenimiento, con descripción de la incidencia ocurrida de forma indefinida. Para ello, se agrupan las incidencias en tipos de incidencias, para establecer la base de la estructuración de la información técnica y económica.

Se quiere conocer la repetición en la aparición de incidencias iguales o similares en activos bajo estudio, para detectar problemas de operación, diseño, mantenimiento montaje, y con ello gestionar los activos reduciendo dicha repetición y así sus costes asociados.

## 10.2 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo, quiere mostrar una forma de extraer información de las averías ocurridas en equipos de plantas de procesos. El objetivo, es contabilizar económicamente las incidencias repetitivas que producen descuadres en el presupuesto asignado a mantenimiento, en el año en curso.

Para poder configurar unos indicadores que muestren los costes de mantenimiento de los equipos, es necesario construirlos desde la base de número de incidencias por equipo y el coste del mismo. A partir de aquí, es cuando se pueden mostrar indicadores más generales de tipos de equipos y tipos de incidencias. Interesante es también disponer de la relación coste/incidencia, ratio que indica el coste de una reparación en una máquina. Sus medias aritméticas por tipos de equipos y tipos de incidencia darán una visión de donde se gastan los recursos de mantenimiento.

De cara a tener un buen control de los recursos disponibles por mantenimiento, se muestran tablas de cantidad de incidencias y costes ocurridos en equipos de una planta de proceso en un año. Resaltando valores de cantidad de incidencias y costes, se observan los puntos críticos de la planta de estudio.

Se incluyen gráficas que muestran los recursos económicos que consumen cada tipo de incidencia y cada tipo de equipo. La comparativa entre intervalos económicos y cantidad de incidencias ocurridas en un tipo de equipos en concreto, es muy útil para demostrar la famosa *ley de Pareto*, en este caso aplicado a las reparaciones de mantenimiento de equipos de una planta industrial; el 80 % de las reparaciones consumen un 20 % de los costes asignados a mantenimiento y el 20 % de reparaciones de envergadura consumen el 80 % de los costes.

En el apartado 10.5, se indica un protocolo para implantar una sistemática para poder identificar los puntos más críticos de una planta industrial. Se quiere huir de las pocas reparaciones de envergadura que consumen un coste elevado, y que su realización no es cuestionable; y acercarse a las enésimas reparaciones que tienen un coste pequeño, pero al repetirse constantemente, consumen un recurso de mantenimiento que no estaba planificado para el presupuesto y con ello el descontrol de la contabilidad de mantenimiento.

Hay tipo de incidencias que se pueden desglosar más, para analizar más concretamente que causas provocan la intervención de mantenimiento. Es el caso de Genérico Mecánica que engloba los tipos de incidencias no incluidos (abrir/cerrar boca de hombre de tanque, conectar/desconectar camión, cambiar rodamientos, medición de vibraciones, etc.). Pero, para no inundar con una tabla llena de tipos de incidencias, se selecciona 14.

## 10.3 CONCEPTO REPETITIVIDAD

Según el diccionario de la *Real Academia de la Lengua Española*:

Repetitividad: Cualidad de repetitivo.

Repetitivo: Que se repite o que tiene repeticiones.

Es por tanto, se utiliza el concepto *repetitividad* para explicar que hay muchas intervenciones que realiza el departamento de mantenimiento que son iguales; o sea, que se repiten. Si su repetición sobrepasa un número prudencial en un año, podría decirse alrededor de 10, la repetición es sucesiva. Puede repetirse una intervención dos o tres veces/año; pero, en el contexto del mantenimiento de una planta de proceso no se considera que tenga repetitividad.

La repetitividad de intervenciones es muy importante descubrirla y mostrarla, estructurarla, cuantificarla tanto numéricamente como económicamente.

Es muy importante concienciarse de que este concepto en según qué máquinas, pasan inadvertidos y hacen descuadrar los presupuestos que se asignan cada año al departamento de mantenimiento, para tener en condiciones las instalaciones a fin de tener la mayor productividad posible. Cosa que se puede mejorar si se minora la repetitividad de ciertos equipos.

## 10.4 INCIDENCIAS Y COSTES

Conocer la cantidad de apariciones ocurridas de un tipo de incidencia de mantenimiento, es muy importante para visualizar la repetitividad que existe y así aplicar recursos para reducir dicha cantidad.

### 10.4.1 PROCESO DE CÁLCULO

#### 10.4.1.1 INCIDENCIAS

$$C_I^{IG} = \sum_{aa} \sum_{ab} \sum_{ac} \sum_{ad} I_I^{IG} \quad (10.1)$$

Siendo:

- $C_I^{IG}$  : Cantidad de incidencias ocurridas en una planta industrial.

- $I_I^{IG}$  vale 0 ó 1 según haya ocurrido ó no ocurrido incidencia del tipo de incidencia y del equipo en concreto. Dicho de otro modo, si existe OT (orden de trabajo) del tipo de incidencia y tipo de equipo dado aparecerá 1, sino 0.
- $AA$  : Cantidad de tipo de equipos.
- $AB$  : Cantidad de equipos de una planta industrial.
- $AC$  : Cantidad de tipos de incidencias.
- $AD$  : Cantidad de incidencias ocurridas en un equipo dado.
- $aa$  : Número de tipo de equipo.
- $ab$  : Número de equipo de una planta industrial.
- $ac$  : Número de tipo de incidencia.
- $ad$  : Número de incidencia ocurrida en un equipo dado.

Sea:

$$\left\{ N_1^{IG_1}, N_2^{IG_1}, \dots, N_{ae}^{IG_1}, \dots, N_{AE}^{IG_1} \right\} \quad (10.2)$$

Siendo:

- $N_{ae}^{IG_1}$  : Nivel de severidad de la cantidad de incidencias.
- $AE$  : Cantidad de niveles de severidad de la cantidad de incidencias.
- $ae$  : Número del nivel de severidad de la cantidad de incidencias.

Sea:

- $\left( C_I^{IG} \right)_{aaac}^{ae}$  : Valor inferior del nivel de severidad de cantidad de incidencias.
- $\left( C_I^s \right)_{aaac}^{ae}$  : Valor superior del nivel de severidad de cantidad de incidencias.

El valor de la cantidad de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de cantidad de incidencias, se define en la ecuación 10.3.

$$\left( C_I^{IG} \right)_{aaac} = \left( \sum_{ab}^{AB} \sum_{ad}^{AD} I_I^{IG} \right)_{abad} \quad (10.3)$$

Siendo:

- $\left( C_I^{IG} \right)_{aaac}$  : Valor de la cantidad de incidencias.

### 10.4.1.2 COSTE

$$C_T^{IG} = \sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} C_{aaabacad}^{IG} \quad (10.4)$$

Siendo:

- $C_T^{IG}$  : Coste de mantenimiento de todas las incidencias ocurridas en un centro industrial o productivo.
- $C_{aaabacad}^{IG}$  : Coste de mantenimiento de una incidencia dada en un equipo.
- $AA$  : Cantidad de tipo de equipos.
- $AB$  : Cantidad de equipos de una planta industrial.
- $AC$  : Cantidad de tipos de incidencias.
- $AD$  : Cantidad de incidencias ocurridas en un equipo dado.
- $aa$  : Número de tipo de equipo.
- $ab$  : Número de equipo de una planta industrial.
- $ac$  : Número de tipo de incidencia.
- $ad$  : Número de incidencia ocurrida en un equipo dado.

Sea:

$$\left\{ N_1^{IG_c}, N_2^{IG_c}, \dots, N_{af}^{IG_c}, \dots, N_{AF}^{IG_c} \right\} \quad (10.5)$$

Siendo:

- $N_{af}^{IG_c}$  : Nivel de severidad de la cantidad de incidencias.
- $AF$  : Cantidad de niveles de severidad de costes.
- $af$  : Número del nivel de severidad de coste.

Sea:

- $\left( R_{C_T^{IG}}^{I, aaac, af} \right)$  : Valor inferior del nivel de severidad de coste.
- $\left( R_{C_T^{IG}}^{S, aaac, af} \right)$  : Valor superior del nivel de severidad de coste.

El valor del coste de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad coste de incidencias, se define en la ecuación 10.6.

$$\left( \begin{matrix} C \\ C_T^{IG} \end{matrix} \right)_{aaac} = \left( \sum_{ab}^{AB} \sum_{ad}^{AD} C_{abad}^{IG} \right)_{aaac} \quad (10.6)$$

Siendo:

- $\left( \begin{matrix} C \\ C_T^{IG} \end{matrix} \right)_{aaac}$  : Valor de coste.

### 10.4.1.3 COSTE - INCIDENCIAS

$$M_{\frac{C_T^{IG}}{C_I^{IG}}} = \frac{C_T^{IG}}{C_I^{IG}} = \frac{\sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} C_{aaabacad}^{IG}}{\sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} I_{I_{aaabacad}}^{IG}} \quad (10.7)$$

Siendo:

- $M_{\frac{C_T^{IG}}{C_I^{IG}}}$  : Ratio entre el coste de mantenimiento y todas las incidencias de un centro industrial o productivo.

Las ecuaciones 10.8 y 10.9, muestran el coste medio por tipo de equipo y por tipos de incidencia, respectivamente.

$$\left( \begin{matrix} IG \\ E \end{matrix} \right)_{aa} = \frac{\sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} C_{abacad}^{IG}}{\sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} I_{I_{abacad}}^{IG}} \quad (10.8)$$

$$\left( \begin{matrix} IG \\ I \end{matrix} \right)_{aa} = \frac{\sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ad}^{AD} C_{aaabad}^{IG}}{\sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ad}^{AD} I_{I_{aaabad}}^{IG}} \quad (10.9)$$

Siendo:

- $\left( \begin{matrix} IG \\ E \end{matrix} \right)_{aa}$  : Coste medio por tipo de equipo.

- $C_{abacad}^{IG}$  : Coste de mantenimiento de tipo de equipo para todos los equipos, incidencias y tipos de incidencias.
- $I_{I abacad}^{IG}$  : Número de incidencias para todos los equipos, incidencias y tipos de incidencias.
- $\overline{C}_I^{IG}$  : Coste medio por tipo de incidencia.
- $C_{aaabad}^{IG}$  : Coste de mantenimiento de tipo de incidencia para todos los equipos, incidencias y tipos de incidencias.
- $I_{I aaabad}^{IG}$  : Número de incidencias para todos los tipos de equipo, equipos e incidencias.

Sea:

$$\left\{ N_1^{IG_M}, N_2^{IG_M}, \dots, N_{ag}^{IG_M}, \dots, N_{AG}^{IG_M} \right\} \quad (10.10)$$

Siendo:

- $N_{ag}^{IG_M}$  : Nivel de severidad de medias coste/incidencia.
- $AG$  : Cantidad de niveles de severidad de la cantidad de incidencias.
- $ag$  : Número del nivel de severidad de la cantidad de incidencias.

Sea:

- $R_{M^{IG} daac ag}^I$  : Valor inferior del nivel de severidad de medias coste/incidencia.
- $R_{M^{IG} daac ag}^s$  : Valor superior del nivel de severidad de medias coste/incidencia.

El valor de la cantidad de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de medias coste/incidencias se puede observar en la ecuación 10.11.

$$\bar{C}_{M_{aaac}}^{IG} = \left( \frac{\sum_{ab} \sum_{ad} C_{abad}^{IG}}{\sum_{ab} \sum_{ad} I_{I_{abad}}^{IG}} \right)_{aaac} \quad (10.11)$$

Siendo:

- $\bar{C}_{M_{aaac}}^{IG}$  : Valor de la media coste/incidencia.

### 10.4.2 CASO DE ESTUDIO

La tabla 10.1 muestra los tipos de incidencias y de equipos en los cuales se aplica el estudio realizado. Estos tipos de equipos no son todos los que existen en una planta de proceso, pero si los más significativos.

TIPOS INCIDENCIA		TIPO EQUIPO
INSTRUMENTACIÓN	1	AGITADOR
SALTA TÉRMICO	2	BOMBA
GENÉRICO ELÉCTRICO	3	CALDERA
ILUMINACIÓN	4	COLUMNA DESTILACIÓN
SERVICIOS	5	FRIGORÍFICA
GENÉRICO MECÁNICA	6	INTERCAMBIADOR
FUGA CIERRE	7	SCRUBBER
FUGA JUNTA	8	DEPÓSITO
LUBRICACIÓN	9	REACTOR
REVISIÓN PLANIFICADA	10	TANQUE
TAPONAMIENTO	11	POLIPASTO
BOMBA CLAVADA	12	FILTRO
AYUDAS A PRODUCCIÓN	13	INSTRUMENTACIÓN
SEGURIDAD	14	BARREDORA
	15	RUTA

Tabla 10.1- Tipos de incidencias y equipos

Las tablas 10.2, 10.3 y 10.4 muestran el número de actuaciones que se han realizado en mantenimiento, costes y medias entre costes y tipos de incidencias. Por tanto, la cantidad de incidencias, el coste y las medias entre coste e incidencia total son:

$$C_I^{IG} = \sum_{aa} \sum_{ab} \sum_{ac} \sum_{ad} I_{I_{aaabacad}}^{IG} = 10.211 \text{ incidencias}$$

$$C_T^{IG} = \sum_{aa} \sum_{ab} \sum_{ac} \sum_{ad} C_{aaabacad}^{IG} = 2.025.480 \text{ €}$$

$$M_{C_i^{IG}}^{C_T^{IG}} = \frac{C_T^{IG}}{C_i^{IG}} = \frac{\sum_{aa} \sum_{ab} \sum_{ac} \sum_{ad} C_{aaabacad}^{IG}}{\sum_{aa} \sum_{ab} \sum_{ac} \sum_{ad} I_{aaabacad}^{IG}} = \frac{2.025.480}{10.211} = 1.983,59 \text{ €}$$

INCIDENCIAS SURGIDAS PARA MANTENIMIENTO

TIPO DE EQUIPO	TIPOS DE INCIDENCIA													SUMA TOTAL INCIDENCIAS	% INCIDENCIAS	
	INSTRUMENTACIÓN	SALTA TÉRMICO	GENÉRICO ELÉCTRICO	ILUMINACIÓN	SERVICIOS	GENÉRICO MECÁNICA	FUGA CIERRE	FUGA JUNTA	LUBRICACIÓN	REVISIÓN PLANIFICADA	TAPONAMIENTO	BOMBA CLAVADA	AYUDAS A PRODUCCIÓN			SEGURIDAD
AGITADOR	0	29	15	0	0	40	9	1	26	3	0	1	0	0	124	1
BOMBA	104	728	68	2	0	786	165	146	256	580	10	7	13	9	2.874	28
CALDERA	44	5	146	9	0	95	0	5	1	16	0	0	0	2	323	3
COLUMNA DESTILACIÓN	38	1	5	3	17	81	1	54	5	32	3	0	1	0	241	2
FRIGORÍFICA	0	2	35	0	0	4	0	0	0	6	0	0	0	0	47	0
INTERCAMBIADOR	30	0	2	1	2	169	0	110	0	48	14	0	1	3	380	4
SCRUBBER	7	4	1	0	0	15	0	7	0	1	6	0	0	0	41	0
DEPÓSITO	5	12	1	0	0	69	1	10	2	1	0	0	2	0	103	1
REACTOR	347	23	7	106	0	1017	15	210	178	61	41	0	4	7	2.016	20
TANQUE	127	70	15	4	0	1461	3	79	0	160	37	1	1	0	1.958	19
POLIPASTO	0	2	0	0	0	10	0	0	0	13	1	0	0	0	26	0
FILTRO	17	4	4	10	9	284	0	23	4	0	1	0	2	0	358	4
INSTRUMENTACIÓN	871	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	871	9
BARREDORA	0	12	0	0	0	11	0	0	0	0	0	1	0	0	24	0
RUTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	825	0	0	0	0	825	8
<b>TOTAL</b>	<b>1.590</b>	<b>892</b>	<b>299</b>	<b>135</b>	<b>28</b>	<b>4.042</b>	<b>194</b>	<b>645</b>	<b>472</b>	<b>1.746</b>	<b>113</b>	<b>10</b>	<b>24</b>	<b>21</b>	<b>10.211</b>	<b>100</b>

Tabla 10.2- Incidencias surgidas para mantenimiento durante un año

COSTE DE MANTENIMIENTO POR TIPO DE INCIDENCIAS Y EQUIPOS EN €

TIPO DE EQUIPO	TIPOS DE INCIDENCIA													SUMA TOTAL €	% COSTE	
	INSTRUMENTACIÓN	SALTA TÉRMICO	GENÉRICO ELÉCTRICO	ILUMINACIÓN	SERVICIOS	GENÉRICO MECÁNICA	FUGA CIERRE	FUGA JUNTA	LUBRICACIÓN	REVISIÓN PLANIFICADA	TAPONAMIENTO	BOMBA CLAVADA	AYUDAS A PRODUCCIÓN			SEGURIDAD
AGITADOR	0	5.089	4.330	0	0	96.765	1.193	25	4.762	1.624	0	8	0	0	113.797	6
BOMBA	7.614	27.779	34.189	58	0	238.042	70.590	32.560	18.693	60.548	626	4.201	661	3.513	499.074	25
CALDERA	12.086	19	5.128	170	0	19.382	0	377	10	23.974	0	0	0	493	61.639	3
COLUMNA DESTILACIÓN	4.038	1	1.646	110	46.441	28.242	45	8.251	5.155	29.979	282	0	0	0	124.190	6
FRIGORÍFICA	0	69	2.575	0	0	1.572	0	0	0	8.373	0	0	0	0	12.589	1
INTERCAMBIADOR	1.494	0	57	117	33	38.047	0	36.941	0	101.920	933	0	17	1.872	181.432	9
SCRUBBER	127	416	13	0	0	2.076	0	715	0	682	425	0	0	0	4.453	0
DEPÓSITO	594	191	0	0	0	4.052	283	8.507	86	293	0	0	0	0	14.006	1
REACTOR	42.199	1.126	1.535	2.670	0	140.661	457	59.555	3.974	163.220	20.438	0	69	5.794	441.698	22
TANQUE	13.839	1.258	1.370	298	0	111.372	538	13.771	0	6.570	2.009	60	49	0	151.135	7
POLIPASTO	0	124	0	0	0	3.331	0	0	0	1.646	87	0	0	0	5.189	0
FILTRO	687	67	117	105	335	88.853	0	4.456	0	0	0	0	73	0	94.695	5
INSTRUMENTACIÓN	60.591	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60.591	3
BARREDORA	0	806	0	0	0	3.073	0	0	0	0	0	6	0	0	3.885	0
RUTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	257.106	0	0	0	0	257.106	13
<b>TOTAL COSTE €</b>	<b>143.267</b>	<b>36.946</b>	<b>50.961</b>	<b>3.527</b>	<b>46.809</b>	<b>775.470</b>	<b>73.106</b>	<b>165.159</b>	<b>32.679</b>	<b>655.937</b>	<b>24.800</b>	<b>4.276</b>	<b>868</b>	<b>11.673</b>	<b>2.025.480</b>	<b>100</b>

Tabla 10.3- Coste de mantenimiento durante un año

**COSTES MEDIOS POR TIPOS DE INCIDENCIAS Y EQUIPOS EN €**

TIPO DE EQUIPO	TIPOS DE INCIDENCIA													MEDIA COSTE / INCIDENCIA DE TIPO EQUIPO €	
	INSTRUMENTACIÓN	SALTA TÉRMICO	GENÉRICO ELÉCTRICO	ILUMINACIÓN	SERVICIOS	GENÉRICO MECÁNICA	FUGA CIERRE	FUGA JUNTA	LUBRICACIÓN	REVISIÓN PLANIFICADA	TAPONAMIENTO	BOMBA CLAVADA	AYUDAS A PRODUCCIÓN		SEGURIDAD
AGITADOR	0	175	289	0	0	2.419	133	25	183	541	0	8	0	0	472
BOMBA	73	38	503	29	0	303	428	223	73	104	63	600	51	390	221
CALDERA	275	4	35	19	0	204	0	75	10	1.498	0	0	0	247	263
COLUMNA DESTILACIÓN	106	1	329	37	2.732	349	45	153	1.031	937	94	0	0	0	529
FRIGORÍFICA	0	35	74	0	0	393	0	0	0	1.396	0	0	0	0	474
INTERCAMBIADOR	50	0	29	117	16	225	0	336	0	2.123	67	0	17	624	360
SCRUBBER	18	104	13	0	0	138	0	102	0	682	71	0	0	0	161
DEPÓSITO	119	16	0	0	0	59	283	851	43	293	0	0	0	0	238
REACTOR	122	49	219	25	0	138	30	284	22	2.676	496	0	17	828	409
TANQUE	109	18	91	75	0	76	179	174	0	41	54	60	49	0	84
POLIPASTO	0	62	0	0	0	333	0	0	0	127	87	0	0	0	152
FILTRO	40	17	29	11	37	313	0	194	0	0	0	37	0	0	75
INSTRUMENTACIÓN	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
BARREDORA	0	67	0	0	0	279	0	0	0	0	6	0	0	0	117
RUTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	312	0	0	0	0	312
<b>MEDIAS COSTE / INCIDENCIA DE TIPO DE INCIDENCIA €</b>	<b>98</b>	<b>49</b>	<b>161</b>	<b>45</b>	<b>928</b>	<b>402</b>	<b>183</b>	<b>242</b>	<b>170</b>	<b>894</b>	<b>133</b>	<b>61</b>	<b>34</b>	<b>522</b>	

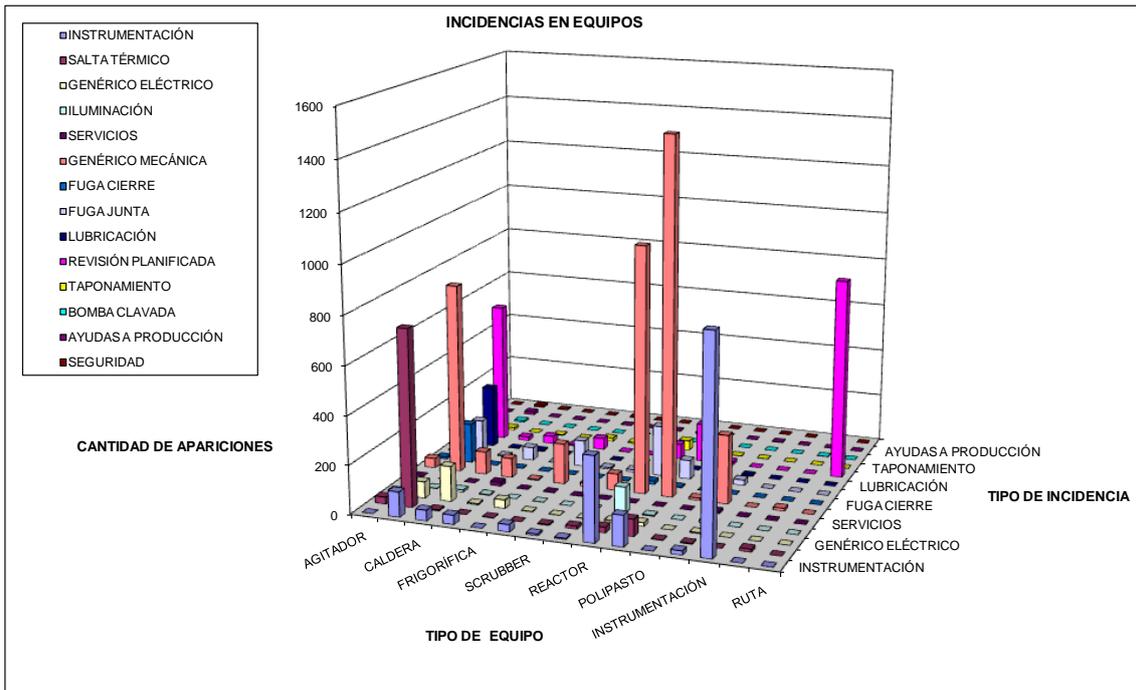
Tabla 10.4- Costes medios por tipos de incidencias durante un año

La tabla 10.5 muestra los valores inferiores y superiores de los rangos que se han utilizado en las tablas 10.2, 10.3 y 10.4.

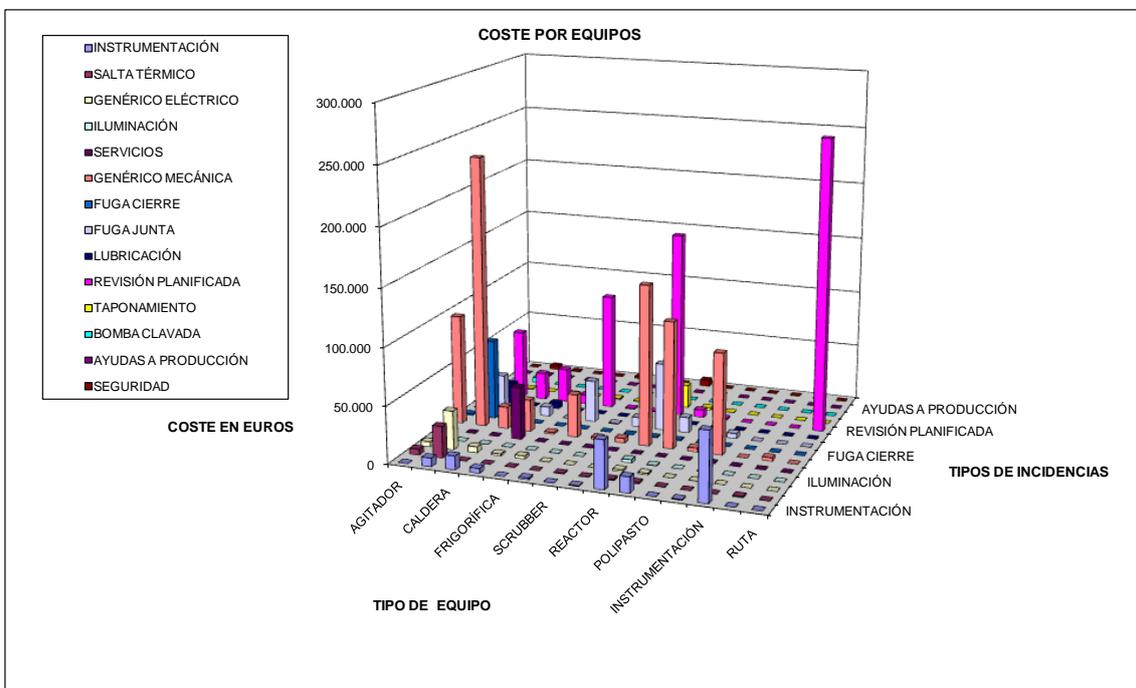
**VALORES DE LOS RANGOS DE SEVERIDAD**

VARIABLES	SEVERIDAD		
	BAJA	MEDIA	ALTA
$R_{C_I}^{IG} \begin{matrix} daac \\ ae \end{matrix}$	50	151	>500
$R_{C_I}^S \begin{matrix} daac \\ ae \end{matrix}$	150	500	>100 000
$R_{C_T}^I \begin{matrix} daac \\ af \end{matrix}$	10 000	50 000, 001	>1000
$R_{C_T}^S \begin{matrix} daac \\ af \end{matrix}$	50 000	100 000	
$R_M^{IG} \begin{matrix} daac \\ dg \end{matrix}$	200	500,001	
$R_M^S \begin{matrix} daac \\ dg \end{matrix}$	500	1000	

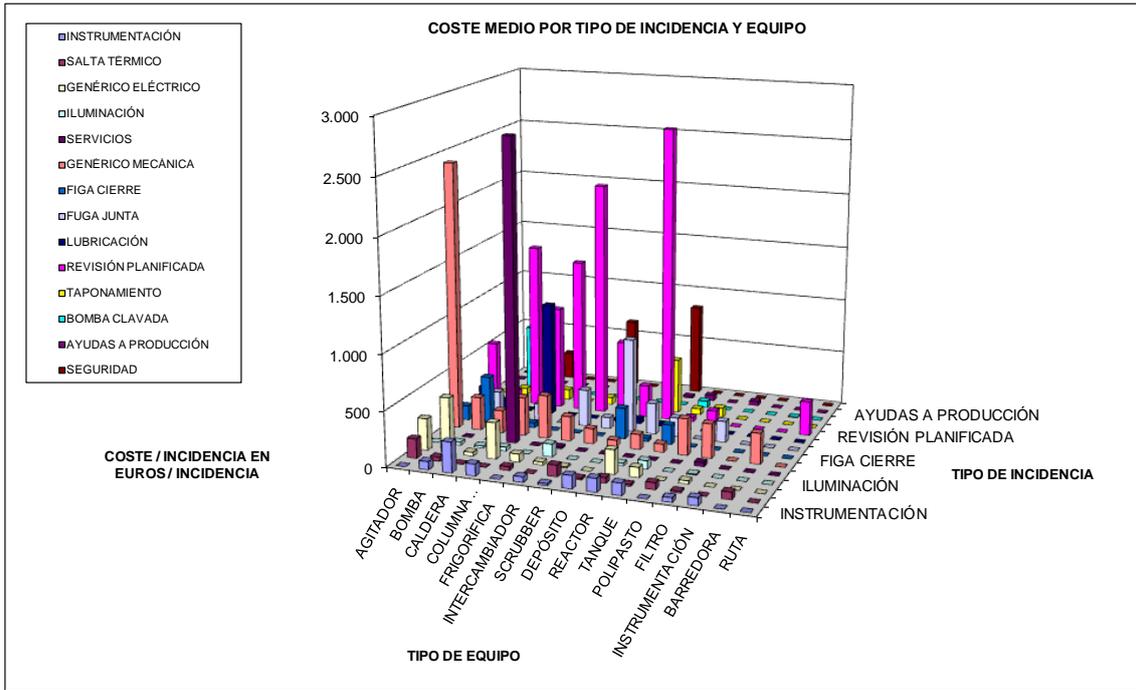
Tabla 10.5 – Valores de rangos de grupos de severidad



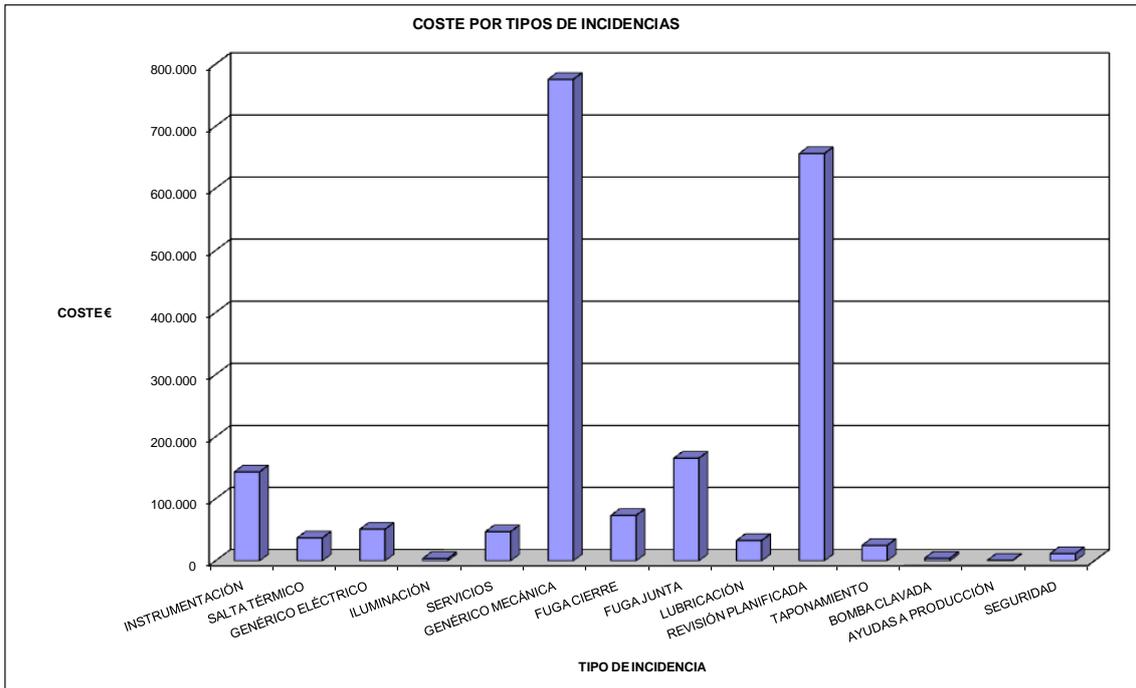
Gráfica 10.1 - Número de incidencias por tipos de equipos y tipos de incidencias



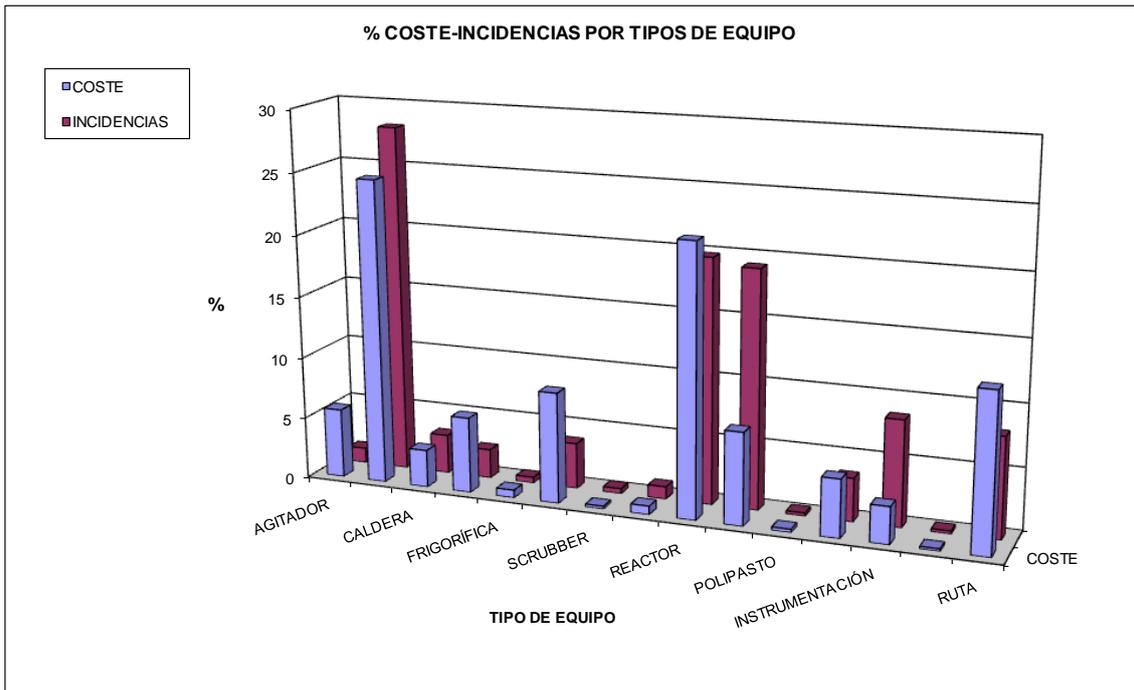
Gráfica 10.2 - Coste por tipos equipo y tipos de incidencias



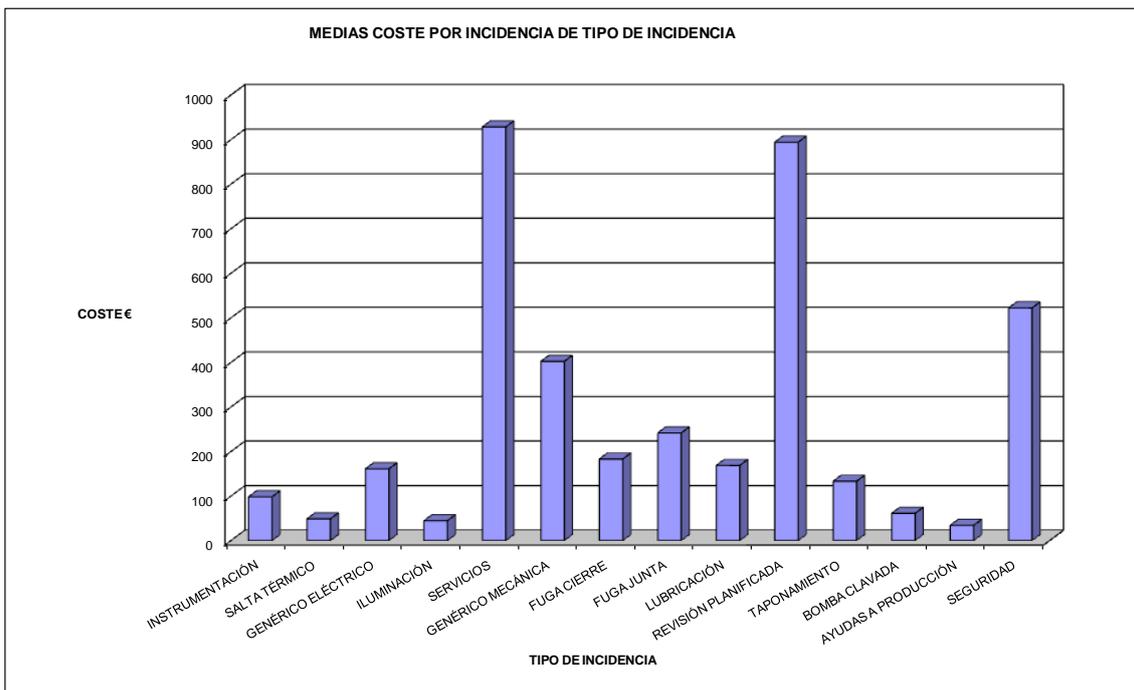
Gráfica 10.3 – Coste medio por tipos de incidencia y tipo de equipo



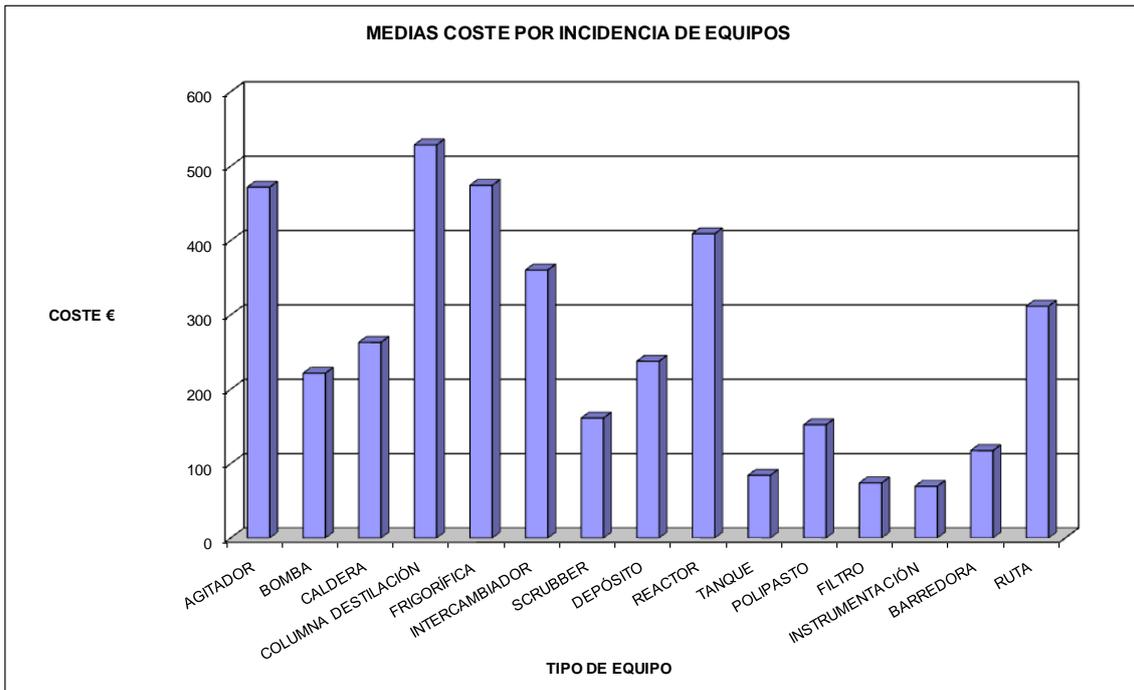
Gráfica 10.4 – Coste por tipo de incidencias



Gráfica 10.5 – Comparativa % coste y % incidencias para tipos de equipo



Gráfica 10.6 – Medias coste / incidencia por tipo de incidencia



Gráfica 10.7 – Medias coste / incidencia por tipo de equipo

## 10.5 MAPA DE VALORES CRÍTICOS E INDICADORES

Este apartado muestra unas tablas (mapas) de los puntos críticos de mantenibilidad de equipos en una planta de proceso. Los puntos críticos, son aquellos donde la cantidad de incidencias ocurridas o el coste asignado para mantener el equipo, son muy elevados.

En este subcapítulo, se muestran los puntos críticos de una parte de todos los equipo de dos tipos de equipo en concreto, como son la Bomba y el Reactor. Para poder visualizar todos los puntos críticos de la planta de proceso, se debe confeccionar este mapa para todos los equipos de todos los tipos de equipos. Por motivos de tamaño del documento se muestran solo los puntos más interesantes.

### 10.5.1 BOMBA

#### 10.5.1.1 PROCESO DE CÁLCULO BOMBA

##### 10.5.1.1.1 INCIDENCIAS BOMBA

$$\left\langle I_{IB}^{IG} \right\rangle_{ab} = \left( \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} I_{IB}^{IG} \right)_{acad} \quad (10.12)$$

Siendo:

- $\left( N_{IB}^{IG} \right)_{ab}$ : Cantidad de incidencias ocurridas en una bomba para todos los tipos de incidencias.
- $I_{IB}^{IG}$ : vale 0 ó 1 según haya ocurrido ó no ocurrido incidencia en una bomba.

Sea:

$$\left\{ N_1^{IG_{IB}}, N_2^{IG_{IB}}, \dots, N_{ah}^{IG_{IB}}, \dots, N_{AH}^{IG_{IB}} \right\} \quad (10.13)$$

Siendo:

- $N_{ah}^{IG_{IB}}$ : Nivel de severidad de la cantidad de incidencias de bombas.
- $AH$ : Cantidad de niveles de severidad de la cantidad de incidencias de bombas.
- $ah$ : Número del nivel de severidad de la cantidad de incidencias de bombas.

Sea:

- $\left( C_{IB}^{IG} \right)_{ah}$ : Valor inferior del nivel de severidad de cantidad de incidencias de bombas por tipo de incidencia.
- $\left( C_{IB}^{IG} \right)_{ah}^s$ : Valor superior del nivel de severidad de cantidad de incidencias de bombas por tipo de incidencia.

El valor de la cantidad de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de cantidad de incidencias de bombas por tipo de incidencia, se define en la ecuación 10.14.

$$\left( C_{IB}^{IG} \right)_{abac} = \left( \sum_{ad}^{AD} I_{IB}^{IG} \right)_{abac} \quad (10.14)$$

Siendo:

- $\left( C_{IB}^{IG} \right)_{abac}$ : Valor de la cantidad de incidencias.

- $I_{IB\ ad}^{IG}$  : vale 0 ó 1 según haya ocurrido ó no ocurrido incidencia en una bomba y tipo de incidencia.

### 10.5.1.1.2 COSTE BOMBA

$$C_{TB\ ab}^{IG} = \left( \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} C_{B\ acad}^{IG} \right)_{ab} \quad (10.15)$$

Siendo:

- $C_{TB\ ab}^{IG}$  : Coste de incidencias ocurridas en una bomba para todos los tipos de incidencias.
- $C_{B\ acad}^{IG}$  : Coste de incidencia ocurrida en una bomba.

Sea:

$$\left\{ N_1^{IG_{CB}}, N_2^{IG_{CB}}, \dots, N_{ak}^{IG_{CB}}, \dots, N_{AK}^{IG_{CB}} \right\} \quad (10.16)$$

Siendo:

- $N_{ak}^{IG_{CB}}$  : Nivel de severidad de la cantidad de incidencias de bombas.
- $AK$  : Cantidad de niveles de severidad de coste de incidencias de bombas.
- $ak$  : Número del nivel de severidad de coste de incidencias de bombas.

Sea:

- $C_{TB\ ak}^{IG\ l}$  : Valor inferior del nivel de severidad de coste de incidencias de bombas por tipo de incidencia.
- $C_{TB\ ak}^{IG\ s}$  : Valor superior del nivel de severidad de coste de incidencias de bombas por tipo de incidencia.

El valor de coste de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de coste de incidencias de bombas por tipo de incidencia, se define en la ecuación 10.17.

$$\left( C_{TB}^{IG} \right)_{abac} = \left( \sum_{ad}^{AD} C_{B\ ad}^{IG} \right)_{abac} \quad (10.17)$$

Siendo:

- $\left( C_{TB}^{IG} \right)_{abac}$  : Valor de coste de incidencias en una bomba y tipo de incidencia.
- $C_{B\ ad}^{IG}$  : Coste de incidencia en una bomba y tipo de incidencia.

### 10.5.1.2 CASO DE ESTUDIO BOMBA

La tabla 10.6 se puede observar un mapa de la cantidad de incidencias por tipos de incidencias ocurridas por las diferentes bombas. Este balance es referido un año.

El rango de gravedad que se toma para cada tipo de equipo varía, no siendo esta variación muy grande. Al final, se selecciona unos valores de compromiso entre la cantidad de incidencias surgidas y la cantidad de puntos críticos de equipos; no es correcto que el 95 % de las máquinas tengan una o dos incidencias al año. Se trata de una planta industrial, donde se quiere mejorar el mantenimiento con una cantidad de recursos asignados.

La tabla 10.7 se puede observar un mapa del coste de mantenimiento por tipos de incidencias de las diferentes bombas. Este balance es referido al año.

**INCIDENCIAS EN BOMBAS DE PLANTA DE PROCESO**

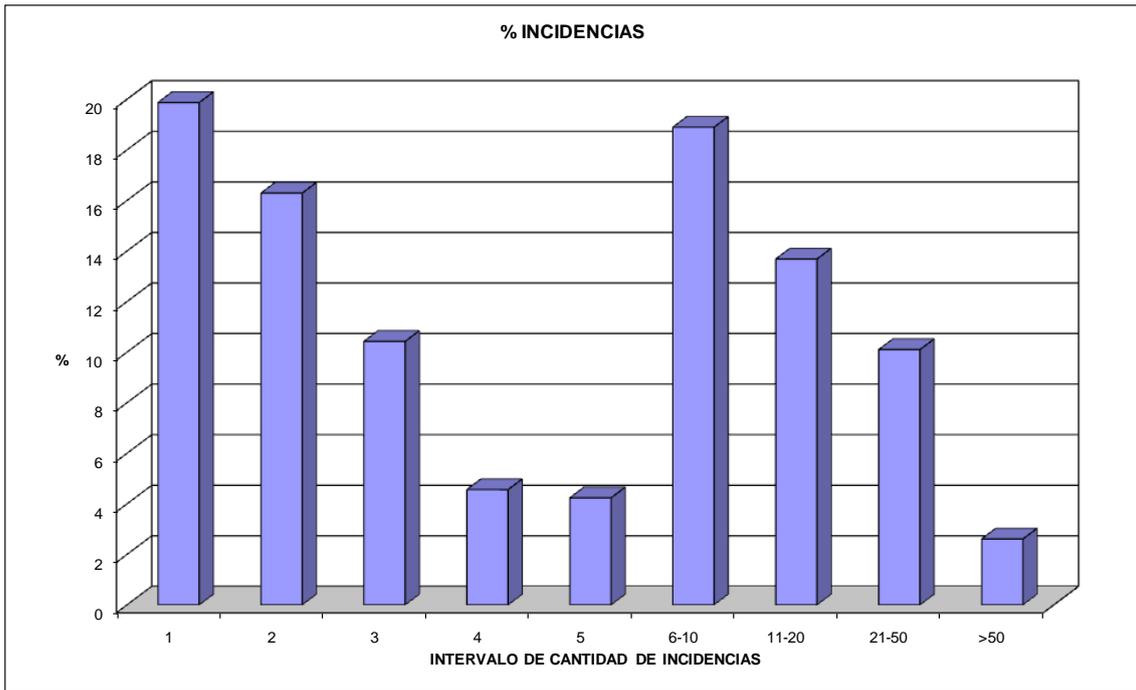
TIPOS DE INCIDENCIAS														TOTAL INCIDENCIAS	BOMBAS
INSTRUMENTACIÓN	SALTA TÉRMICO	GENÉRICO ELÉCTRICO	ILUMINACIÓN	SERVICIOS	GENÉRICO MECÁNICA	FUGA CIERRE	FUGA JUNTA	LUBRICACIÓN	REVISIÓN PLANIFICADA	TAPONAMIENTO	BOMBA CLAVADA	AYUDAS A PRODUCCIÓN	SEGURIDAD		
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	P-041
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	P-042
0	16	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	P-043
2	53	8	0	0	2	0	0	0	10	0	0	0	0	75	P-044
0	3	1	0	0	2	0	1	45	10	0	0	0	0	62	P-045
0	26	1	0	0	4	0	0	0	10	0	0	0	0	41	P-055
0	4	0	0	0	1	0	1	0	10	0	0	0	0	16	P-056
0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	P-057
1	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	6	P-058
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	P-059
1	1	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	6	P-060
8	42	0	0	0	1	0	0	0	9	1	0	0	0	61	P-061
4	1	0	0	0	1	8	1	0	0	1	0	0	0	16	P-062
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	P-063
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	P-064
2	2	1	0	0	12	22	3	1	6	0	0	0	0	49	P-065
1	2	0	0	0	2	7	0	0	0	0	0	0	0	12	P-066
12	0	0	0	0	14	5	1	31	0	0	0	0	0	63	P-067
2	0	0	0	0	10	0	0	0	5	0	0	0	0	17	P-068
0	0	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	6	P-069
1	1	2	0	0	7	5	3	2	5	0	0	0	0	26	P-070
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	P-071
1	1	1	0	0	8	2	0	26	0	0	0	0	0	39	P-072
0	1	4	0	0	1	6	0	0	0	0	0	0	0	12	P-073
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3	P-074

Tabla 10.6 – Incidencias en bombas de una planta de proceso

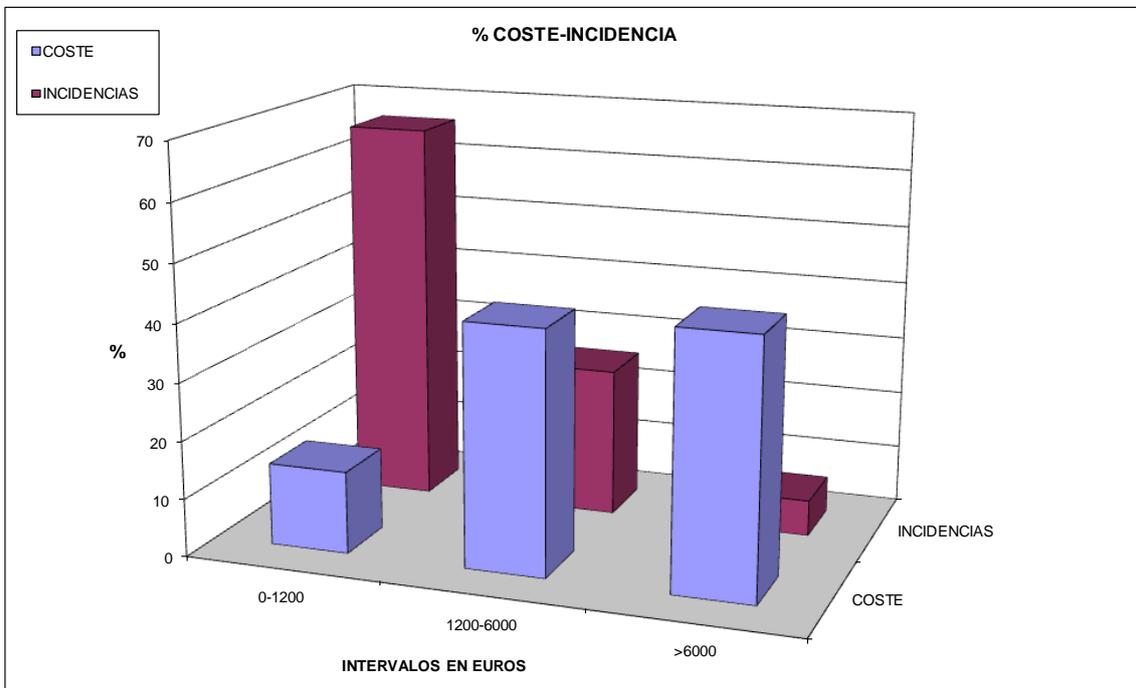
COSTE DE MANTENIMIENTO DE BOMBAS EN PLANTA DE PROCESO															
TIPOS DE INCIDENCIAS															
INSTRUMENTACIÓN	SALTA TÉRMICO	GENÉRICO ELÉCTRICO	ILUMINACIÓN	SERVICIOS	GENÉRICO MECÁNICA	FUGA CIERRE	FUGA JUNTA	LUBRICACIÓN	REVISIÓN PLANIFICADA	TAPONAMIENTO	BOMBA CLAVADA	AYUDAS A PRODUCCIÓN	SEGURIDAD	TOTAL COSTE EN EUROS	BOMBAS
39	0	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0	0	0	133	P-040
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P-041
0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	P-042
0	199	0	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	257	P-043
268	994	1.045	0	0	284	0	0	0	1.052	0	0	0	0	3.642	P-044
0	154	1.592	0	0	6.574	0	373	2.114	298	0	0	0	0	11.105	P-045
0	318	1	0	0	3.442	0	0	0	1.051	0	0	0	0	4.812	P-055
0	49	0	0	0	50	0	1	0	1.193	0	0	0	0	1.294	P-056
0	184	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	185	P-057
4	0	0	0	0	0	11	38	0	0	0	0	0	0	52	P-058
378	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	378	P-059
109	119	0	0	0	0	0	533	0	0	0	0	0	0	762	P-060
195	441	0	0	0	47	0	0	0	2.011	29	0	0	0	2.723	P-061
269	0	0	0	0	311	2.775	25	0	0	48	0	0	0	3.427	P-062
0	0	0	0	0	18	364	0	0	0	0	0	0	0	383	P-063
0	0	0	0	0	261	0	0	0	0	0	0	0	0	261	P-064
41	256	1.971	0	0	2.737	18.274	4.202	479	139	0	0	0	0	28.101	P-065
62	28	0	0	0	0	2.779	0	0	0	0	0	0	0	2.868	P-066
677	0	0	0	0	1.233	2.153	31	1.464	0	0	0	0	0	5.558	P-067
251	0	0	0	0	3.574	0	0	0	26	0	0	0	0	3.851	P-068
0	0	0	0	0	72	1.604	0	0	0	0	0	0	0	1.675	P-069
201	0	1.832	0	0	2.470	5.791	186	173	21	0	0	0	0	10.675	P-070
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P-071
92	445	1.215	0	0	3.978	776	0	856	0	0	0	0	0	7.362	P-072
0	4	72	0	0	11	1.828	0	0	0	0	0	0	0	1.915	P-073
0	0	0	0	0	1.438	0	0	0	0	108	0	0	0	1.545	P-074

Tabla 10.7 – Costes en bombas de una planta de proceso

Como puede comprobarse, los resultados obtenidos derivan en un análisis profundo de las causas de los mismos y como reducirlos para aumentar la eficiencia de la planta de procesos.



Gráfica 10.8 - % Incidencias según intervalos de cantidades de incidencias en bombas



Gráfica 10.9 - Comparativa % coste respecto % incidencias en bomba

## 10.5.2 REACTOR

### 10.5.2.1 PROCESO DE CÁLCULO REACTOR

#### 10.5.2.1.1 INCIDENCIAS REACTOR

$$N_{IR}^{IG} = \left( \sum_{ac} \sum_{ad} I_{IR\ acad}^{IG} \right)_{ab} \quad (10.18)$$

Siendo:

- $N_{IR}^{IG}$ : Cantidad de incidencias ocurridas en un reactor para todos los tipos de incidencias.
- $I_{IR\ acad}^{IG}$ : vale 0 ó 1 según haya ocurrido ó no ocurrido incidencia en un reactor.

Sea:

$$\left\{ N_1^{IG}, N_2^{IG}, \dots, N_{al}^{IG}, \dots, N_{AL}^{IG} \right\} \quad (10.19)$$

Siendo:

- $N_{al}^{IG}$ : Nivel de severidad de la cantidad de incidencias de reactores.
- $AL$ : Cantidad de niveles de severidad de la cantidad de incidencias de reactores.
- $al$ : Número del nivel de severidad de la cantidad de incidencias de reactores.

Sea:

- $C_{IR\ al}^{IG}$ : Valor inferior del nivel de severidad de cantidad de incidencias de reactores por tipo de incidencia.
- $C_{IR\ al}^s$ : Valor superior del nivel de severidad de cantidad de incidencias de reactores por tipo de incidencia.

El valor de la cantidad de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de cantidad de incidencias de reactores por tipo de incidencia, se define en la ecuación 10.20.

$$\left( C_{IR}^{IG} \right)_{abac} = \left( \sum_{ad}^{AD} I_{IR\ ad}^{IG} \right)_{abac} \quad (10.20)$$

Siendo:

- $\left( C_{IR}^{IG} \right)_{abac}$  : Valor de la cantidad de incidencias.
- $I_{IR\ ad}^{IG}$  : vale 0 ó 1 según haya ocurrido ó no ocurrido incidencia en un reactor y tipo de incidencia.

#### 10.5.2.1.2 COSTE REACTOR

$$\left( C_{TR}^{IG} \right)_{ab} = \left( \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} C_{R\ acad}^{IG} \right)_{ab} \quad (10.21)$$

Siendo:

- $\left( C_{TR}^{IG} \right)_{ab}$  : Coste de incidencias ocurridas en un reactor para todos los tipos de incidencias.
- $C_{R\ acad}^{IG}$  : Coste de incidencia ocurrida en un reactor.

Sea:

$$\left\{ N_1^{IG_{CR}}, N_2^{IG_{CR}}, \dots, N_{am}^{IG_{CR}}, \dots, N_{AM}^{IG_{CR}} \right\} \quad (10.22)$$

Siendo:

- $N_{am}^{IG_{CR}}$  : Nivel de severidad de la cantidad de incidencias de reactores.
- $AM$  : Cantidad de niveles de severidad de coste de incidencias de reactores.

- $am$  : Número del nivel de severidad de coste de incidencias de reactores.

Sea:

- $\left( r_{CTR}^{IG} \right)_{am}^I$  : Valor inferior del nivel de severidad de coste de incidencias de reactores por tipo de incidencia.
- $\left( r_{CTR}^{IG} \right)_{am}^S$  : Valor superior del nivel de severidad de coste de incidencias de reactores por tipo de incidencia.

El valor de coste de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de coste de incidencias de reactores por tipo de incidencia, se define en la ecuación 10.23.

$$\left( r_{CTR}^{IG} \right)_{abac}^C = \left( \sum_{ad}^{AD} C_{R\ ad}^{IG} \right)_{abac} \quad (10.23)$$

Siendo:

- $\left( r_{CTR}^{IG} \right)_{abac}^C$  : Valor de coste de incidencias en una bomba y tipo de incidencia.
- $C_{R\ ad}^{IG}$  : Coste de incidencia en una bomba y tipo de incidencia.

### 10.5.2.2. CASO DE ESTUDIO REACTOR

En la tabla 10.8 se puede observar un mapa de la cantidad de incidencias por tipos de incidencias, ocurridas por los diferentes reactores. Este balance es referido a un año. La tabla 10.9 se puede observar un mapa del coste de mantenimiento por tipos de incidencias de los diferentes reactores.

INCIDENCIAS EN REACTORES EN PLANTA DE PROCESO															
TIPOS DE INCIDENCIAS															
INSTRUMENTACIÓN	SALTA TÉRMICO	GENÉRICO ELÉCTRICO	ILUMINACIÓN	SERVICIOS	GENÉRICO MECÁNICA	FUGA CIERRE	FUGA JUNTA	LUBRICACIÓN	REVISIÓN PLANIFICADA	TAPONAMIENTO	BOMBA CLAVADA	AYUDAS A PRODUCCIÓN	SEGURIDAD	TOTAL INTERVENCIONES	REACTORES
10	2	0	0	0	24	0	4	0	0	0	0	0	0	40	V-039
4	7	0	6	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	21	V-040
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	V-041
4	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	8	V-042
8	0	1	0	0	2	0	2	0	2	0	0	0	0	15	V-043
30	0	0	0	0	15	0	1	0	2	0	0	0	0	48	V-044
1	2	0	0	0	4	0	1	0	1	0	0	0	0	9	V-045
1	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	5	V-046
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	V-047
3	0	0	0	0	18	0	7	0	0	0	0	0	0	28	V-048
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	V-049
0	0	0	0	0	36	0	2	0	0	0	0	0	0	38	V-050
0	0	0	0	0	4	0	8	12	0	0	0	0	0	24	V-051
0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	4	V-052
3	0	0	6	0	15	0	1	0	0	0	0	0	0	25	V-053
2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	V-054
0	0	0	6	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	8	V-055
8	0	0	0	0	8	0	1	0	0	1	0	0	0	18	V-056
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	V-057
5	0	0	0	0	25	0	17	0	0	0	0	0	0	47	V-058
2	0	0	0	0	7	0	2	0	0	0	0	0	0	11	V-059
2	2	0	3	0	7	13	2	0	0	2	0	0	0	31	V-060
4	0	2	21	0	11	0	2	0	0	2	0	0	0	42	V-061
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	V-062
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	V-063
0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	V-064
11	0	0	2	0	49	1	16	1	0	8	0	0	0	88	V-065
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	V-066
2	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	8	V-067
0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	5	V-068
8	0	0	1	0	27	0	3	3	0	1	0	1	0	44	V-069
0	1	0	0	0	12	0	0	0	0	1	0	1	0	15	V-070
11	1	0	4	0	24	0	21	0	0	3	0	0	0	64	V-071

Tabla 10.8 – Incidencias en reactores en plantas de proceso

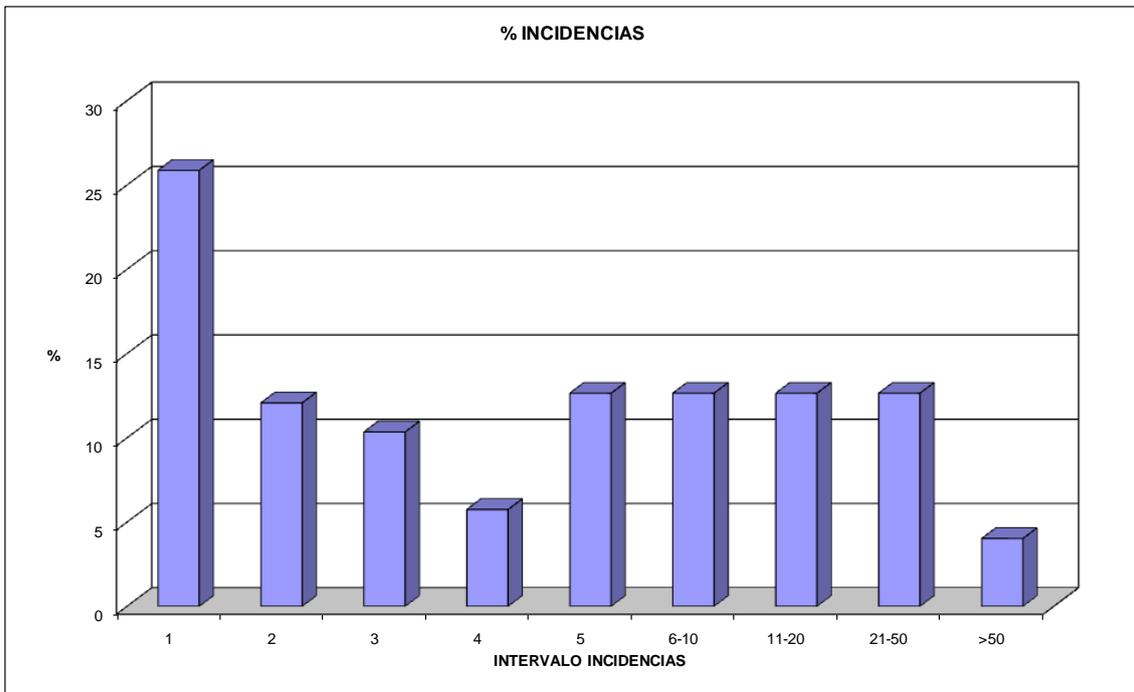
COSTE EN REACTORES DE PLANTAS DE PROCESO															
TIPOS DE INCIDENCIAS															
INSTRUMENTACIÓN	SALTA TÉRMICO	GENÉRICO ELÉCTRICO	ILUMINACIÓN	SERVICIOS	GENÉRICO MECÁNICA	FUGA CIERRE	FUGA JUNTA	LUBRICACIÓN	REVISIÓN PLANIFICADA	TAPONAMIENTO	BOMBA CLAVADA	AYUDAS A PRODUCCIÓN	SEGURIDAD	TOTAL COSTE EN EUROS	REACTORES
567	57	0	0	0	1.543	0	150	0	0	0	0	0	0	2.317	V-039
82	224	0	54	0	477	0	0	0	0	0	0	0	0	837	V-040
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	V-041
29	0	0	0	0	301	0	0	0	0	0	0	0	0	330	V-042
154	0	25	0	0	4	0	592	0	42	0	0	0	0	817	V-043
3.795	0	0	0	0	547	0	9	0	56	0	0	0	0	4.408	V-044
23	-6	0	0	0	180	0	79	0	389	0	0	0	0	665	V-045
14	0	0	0	0	178	0	0	0	0	0	0	0	0	192	V-046
0	0	0	0	0	229	0	0	0	0	0	0	0	0	229	V-047
2.455	0	0	0	0	1.733	0	2.653	0	0	0	0	0	0	6.842	V-048
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	V-049
0	0	0	0	0	930	0	254	0	0	0	0	0	0	1.185	V-050
0	0	0	0	0	482	0	525	717	0	0	0	0	0	1.725	V-051
0	0	0	0	0	64	0	11	128	0	0	0	0	0	203	V-052
272	0	0	50	0	366	0	21	0	0	0	0	0	0	709	V-053
71	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	102	V-054
0	0	0	112	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	131	V-055
48	0	0	0	0	172	0	33	0	0	1	0	0	0	254	V-056
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	V-057
293	0	0	0	0	1.157	0	5.026	0	0	0	0	0	0	6.476	V-058
31	0	0	0	0	104	0	10.809	0	0	0	0	0	0	10.945	V-059
46	51	0	31	0	769	373	0	0	0	259	0	0	0	1.530	V-060
20.316	0	44	172	0	411	0	326	0	0	622	0	0	0	21.891	V-061
0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	V-062
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	516	0	0	0	516	V-063
0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	19	V-064
1.077	0	0	14	0	9.479	5	2.400	0	0	419	0	0	0	13.396	V-065
0	0	0	0	0	118	0	0	0	0	0	0	0	0	118	V-066
18	0	0	0	0	727	0	0	0	0	0	0	0	0	744	V-067
0	13	0	0	0	87	0	0	0	0	134	0	0	0	233	V-068
532	0	0	110	0	6.595	0	2.294	166	0	6.085	0	0	0	15.781	V-069
0	1	0	0	0	551	0	0	0	0	108	0	2	0	661	V-070
718	22	0	84	0	1.655	0	8.068	0	0	199	0	0	0	10.746	V-071

Tabla 10.9 – Costes en reactores de plantas de proceso

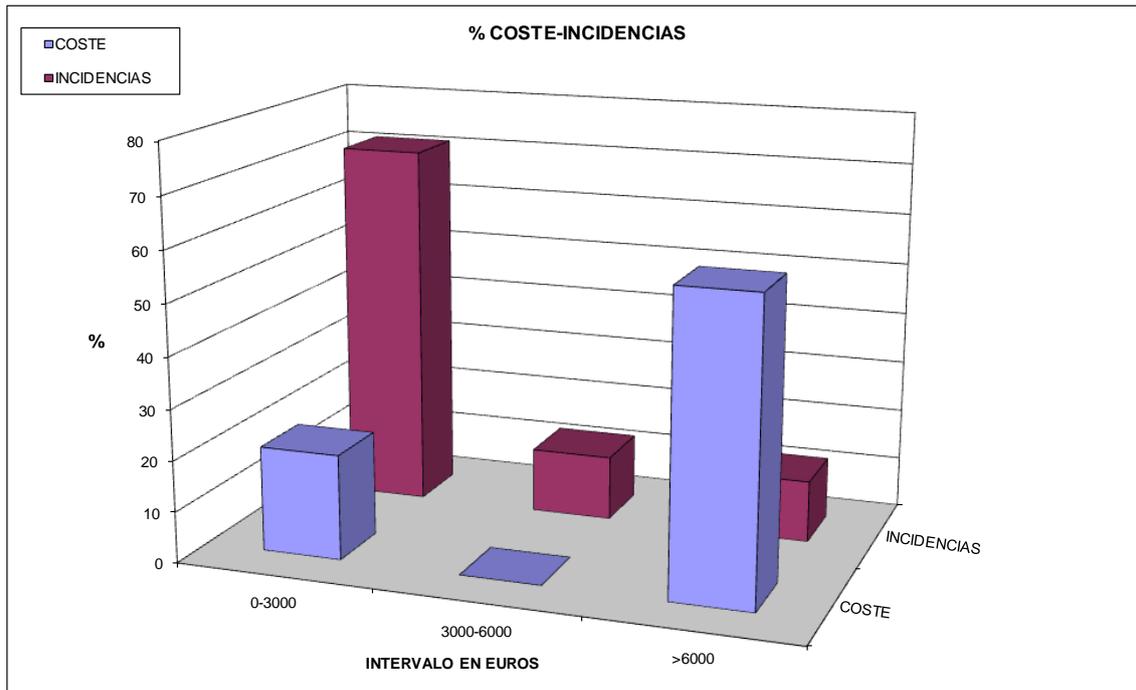
La tabla 10.10 muestra los valores inferiores y superiores de los rangos que se han utilizado en las tablas 10.6, 10.7, 10.8 y 10.9. Estos valores de cantidad de incidencias y coste en euros, son similares tanto para las bombas como para los reactores.

VARIABLES	SEVERIDAD		
	BAJA	MEDIA	ALTA
$R_{C_{IB}^{IG}}^I = R_{C_{IR}^{IG}}^I$	5	16	>25
$R_{C_{IB}^{IG}}^S = R_{C_{IR}^{IG}}^S$	15	25	
$R_{C_{TB}^{IG}}^I = R_{C_{TR}^{IG}}^I$	1500	3000,001	>5000
$R_{C_{TB}^{IG}}^S = R_{C_{TR}^{IG}}^S$	3000	5000	

Tabla 10.10 – Valores de rangos de grupos de severidad para bombas y reactores



Gráfica 10.10 - % Incidencias según intervalos de cantidades de incidencias en reactores



Gráfica 10.11 - Comparativa % coste respecto % incidencias en reactores

## 10.6 ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN EN INDUSTRIAS DE PROCESOS

La figura 10.1 muestra el esquema general del protocolo de implantación en industria de proceso, que se ha desglosado en 4 etapas principales:

- 1- Organización de activos: Se pueden organizar los activos en sectores dentro de la planta o en tecnologías utilizadas en la misma.
- 2- Selección de activos para estudio: Dos opciones, la primera por criticidades y la segunda por tipos de máquinas. Siempre teniendo en cuenta el marco económico de la selección.
- 3- Extracción de ratios y comparativa: Para poder resaltar los puntos más perjudiciales para la mantenibilidad de la planta, es necesario extraer las averías repetitivas, su coste y posteriormente se debe representar de forma que se puedan detectar de forma visual.

- 4- Selección del problema y soluciones: Una vez construido el mapa de puntos críticos, se deben seleccionar problemas y estructurar sus posibles soluciones, tanto a nivel tecnológico como a nivel económico.

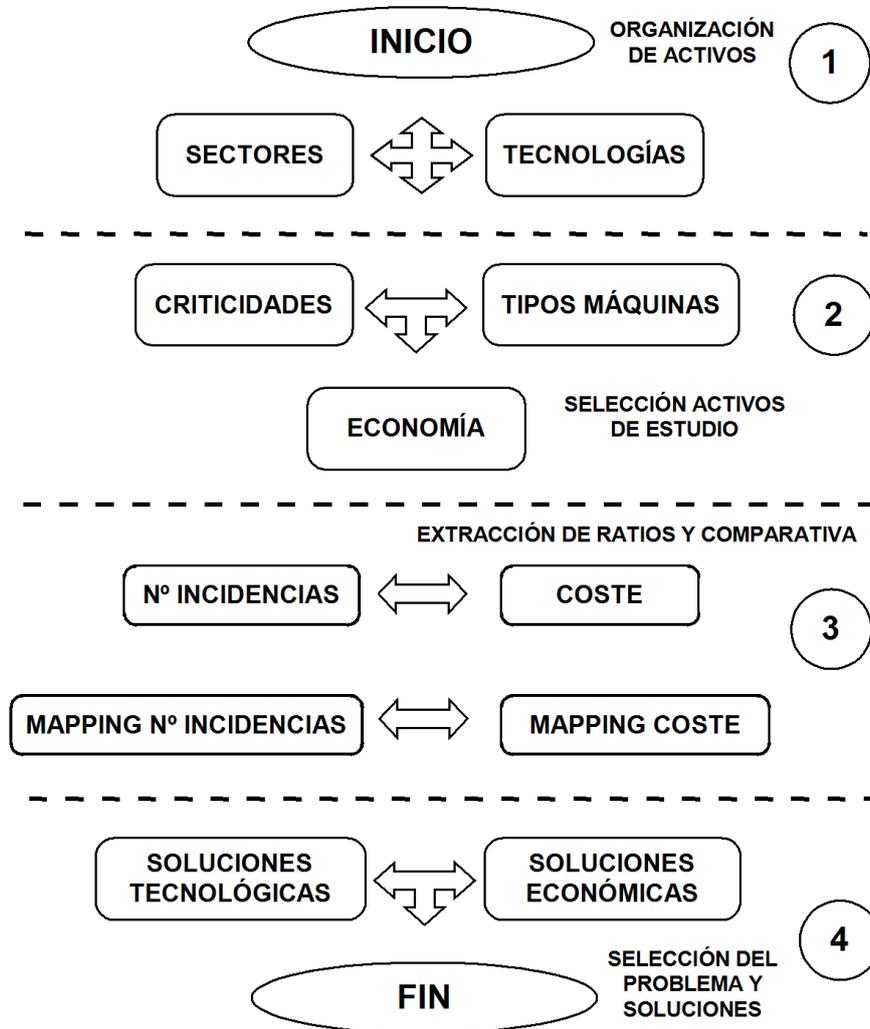


Figura 10.1 Esquema Organización de la Información en Industria de Procesos

En la primera etapa del protocolo de implantación (organización de activos), se deben seleccionar los activos de estudio por uno de los dos caminos que se muestran. En la figura 10.2, se puede observar una forma de seleccionarlos por sectores o zonas físicas dentro del centro industrial o productivo de estudio; donde, coexisten plantas de proceso, almacenes de materia prima y producto acabado, tanques, depuradora, cogeneración, etc. Lo que se pretende explicar es que cada uno de los sectores o zonas, dan servicio a las plantas de proceso que generan la producción de los productos que genera dicho centro industrial o productivo. Es en la zona de oficinas

donde se gestiona todas las interacciones entre sectores, para dar sentido a la actividad empresarial de la industria de procesos.

La figura 10.3 indica la otra forma de organizar los activos que se desean estudiar y es haciéndolo a través de las diferentes tecnologías existentes. Parecido al esquema de la figura 10.2, las diversas tecnologías dan servicio a los reactores e intercambiadores de calor, que es donde se producen las reacciones y procesos químicos.



Figura 10.2 Etapa organización de activos. Sectores

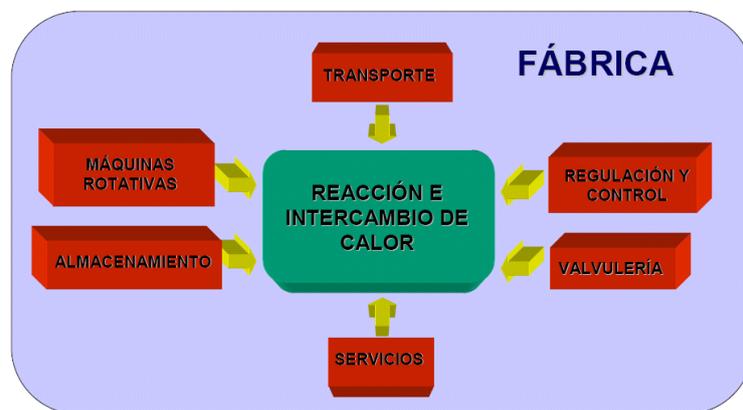


Figura 10.3 Etapa organización de activos. Tecnologías

Una vez decidido la forma de organizar los activos, en la etapa 2 se deben seleccionar los activos más críticos, para posteriormente extraer toda la información a nivel de incidencias por mantenimiento ocurrido en un plazo de tiempo determinado. Es en la figura 10.4 se indica que los activos que se seleccionen pueden ser bajo dos perspectivas diferentes, una es según la criticidad del activo y otra según el tipo de

máquina que sea (bomba, reactor, agitador, caldera, etc.); los dos criterios están bajo la supervisión de la:

- Seguridad
- Medio ambiente
- Calidad
- Productividad
- Mantenibilidad

Cualquiera que sea el criterio de selección, hay que tener en cuenta que una parte importante en la decisión, es el coste que representa la operativa de dicho activo y no solo a nivel de mantenimiento, sino las repercusiones medio ambientales, de seguridad, calidad y productivas; que normalmente son costes indirectos escondidos en otros conceptos.



Figura 10.4 Etapa selección activos para estudio

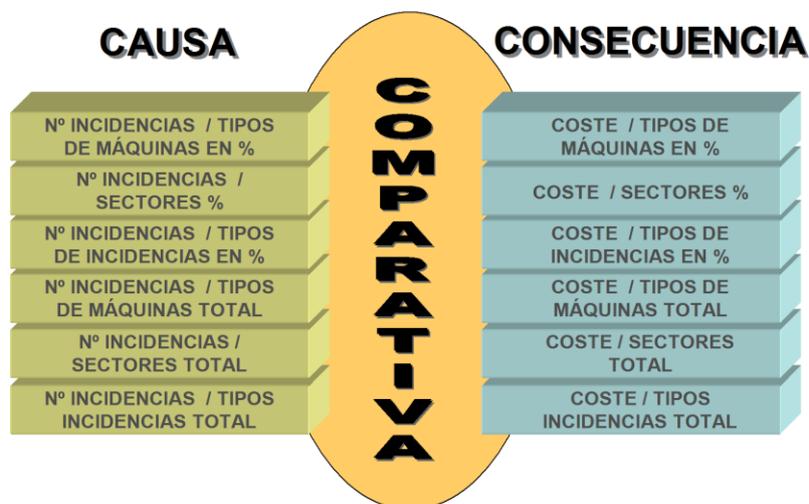


Figura 10.5 Etapa extracción de ratios y comparativa

La etapa 3 (ver figura 10.5) (extracción de ratios y comparativa) indica la necesidad de extraer información de la evolución de la mantenibilidad, de los equipos que se han seleccionado para su estudio. Los ratios se basan en la cantidad de incidencias ocurridas en mantenimiento respecto sectores, tipos de máquinas y tipos de incidencias. Para ver los porcentajes de cada ratio se pueden extraer respecto al total o en %. Al confeccionar los mismos ratios; pero en lugar de incidencias, mostrar los costes, ya se está en disposición de realizar una comparativa, para ver que coste por incidencia es necesario aplicar para mantener cada uno de los activos estudiados.

Una vez mostrada toda la información acerca de la mantenibilidad de los activos, se selecciona los más críticos y se definen varias soluciones de mejoras para su funcionamiento. Las soluciones adoptadas se basan en dos grandes rasgos, soluciones tecnológicas y soluciones económicas; de hecho, la solución final es una combinación de ambas. Ver figura 10.6.

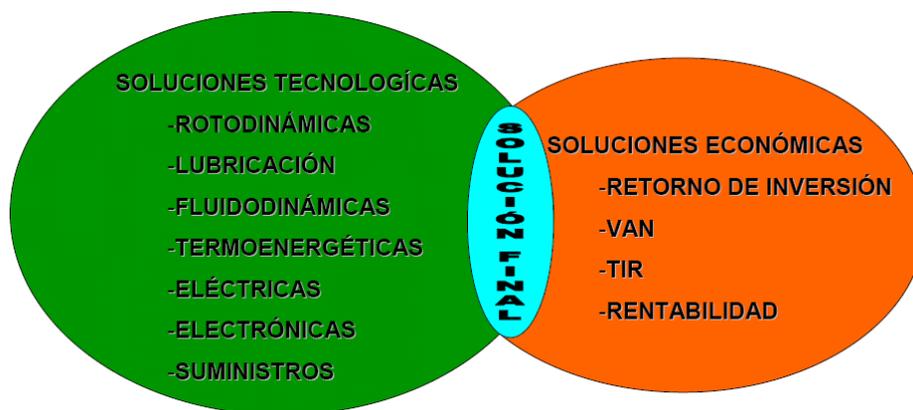


Figura 10.6 Etapa Selección de Problema y Soluciones

## 10.7 RESULTADOS

En la tabla 10.2, aparecen 580 incidencias (gravedad alta (rojo)) del tipo de incidencia *Revisión Planificada*, del tipo de equipo *Bomba*. En la tabla 10.3, se observa que el coste es 60.548 € (gravedad media (amarillo)) y un cociente 104,39 €/incidencia (gravedad baja (verde)), ver tabla 10.4. Es ejemplo de la necesidad de disponer de tres tablas de indicadores de gestión, para realizar una valoración de la situación de funcionamiento del mantenimiento en la planta de proceso.

Se observa las tablas 10.2, 10.3 y 10.4; el tipo de incidencia *Salta Térmico* del tipo de equipo *Bomba*, tiene 728 incidencias (rojo) es muy elevado, con 27.779 € de coste (verde) y un cociente de 38 € no considerado crítico. Dado los resultados obtenidos en el estudio, se considera que el cociente entre coste e incidencia no es crítico; pero, si su repetición.

En el tipo de equipo *Reactor* se han producido 61 (verde (poco crítico)) incidencias del tipo de incidencia *Revisión Planificada*, con un coste total de 163.320 € (rojo (muy crítico)), con un cociente coste/incidencia también crítica.

Las tablas 10.6 y 10.7 muestra 22 incidencias (amarillo) en la bomba P-065 del tipo de incidencia *Fuga Cierre*; el coste total asociado es de 18.274 € (rojo); con un cociente de 831 €/incidencia, valor no indicado. Cuando un cierre de una bomba está fugando, se debe reparar el cierre; normalmente dicha operación tiene un coste elevado.

La gráfica 10.8 muestra el % de incidencias ocurridas en todas las bombas por intervalos de cantidad de incidencias. Es normal que para mantener muchas bombas se necesiten una cantidad de incidencias/año que no sobrepase 10. Ello quiere decir que se interviene menos de una vez por mes. Destacar que aproximadamente el 20 % de las bombas solo hay que intervenir una vez/año, y que la suma de todas las bombas que hay que intervenir entre 1 y 5 veces/año es de alrededor del 50%.

Importante destacar es que algo más de un 2 % de las bombas hay que intervenir más de 50 veces/año para su mantenimiento. La frecuencia de actuación del departamento de mantenimiento es de más de una vez/semana, cosa que para tecnología de industrias de procesos no se considera mantenimiento; se considera, operatividad de la máquina. Realmente, en este 2 % de las bombas es donde existen problemas de funcionamiento, mantenibilidad, diseño, etc., y hay que resolverlo con relativa celeridad.

La gráfica 10.9 muestra la comparativa entre el % coste y % incidencias para mantener las bombas. Como se puede observar, en el rango >6.000 euros, pocas incidencias causan un gasto elevado a mantenimiento, es aquí donde hay que analizar las causas de estos elevados costes.

La tabla 10.8 muestra cantidad de incidencias elevada en tipo de incidencia *Generación Mecánica*, ya que hay incidencias diversas mecánicas que afectan a la funcionalidad o al estado del reactor, incluso no afectando a su producción. Pero, las incidencias más costosas son las 2 del reactor V-059 con un coste de 10.809 € para el tipo de incidencia *Fuga Junta*. Estas incidencias se resolvieron aplicando muchos recursos, ya que hay que vaciar e inertizar el reactor, ponerlo en seguridad, descalorifugar, reparar la fuga, volver a calorifugar, quitar las seguridades y realizar pruebas de presión.

La gráfica 10.10 muestra el % de incidencias ocurridas en todos los reactores por intervalos de cantidad de incidencias. Es normal que para mantener muchos reactores se necesiten una cantidad de incidencias/año que no sobrepase 10. Esta reflexión es la misma que para las bombas.

## 10.8 CONCLUSIONES

La reducción de número de incidencias y coste en el mantenimiento de un equipo, se basa en encontrar la mejor combinación de soluciones tecnológicas y económicas, para que la interacción entre proceso, mantenimiento, mejora técnica-económica dé el máximo rendimiento.

Después de estudiar y analizar las causas del tipo de incidencia *Salta Térmico*, se llega a la conclusión que puede ser por sobrecarga del equipo, falta de lubricación o refrigeración, trabajar fuera de curva de diseño, etc. Este problema no debe ser asumido por el departamento de mantenimiento, ya que la instalación está trabajando incorrectamente y el coste total anual es muy elevado.

Indagando en la gestión de los reactores, se llegó a la conclusión, gracias a un exhaustivo estudio, que las causas eran debidas a la reglamentación en Aparatos a Presión que debe superar dichos equipos, y que obligan a realizar unas intervenciones muy laboriosas y complejas.

Las gráficas de 10.1 a 10.7 muestran un reflejo de la diversidad de incidencias y costes. Pero, se observa como poca cantidad en número de incidencias, generan grandes costes de mantenimiento en equipos del tipo depósitos o intercambio de calor.

Ello es debido, a que la frecuencia de aparición de fallos es baja, pero la solución es costosa, es activos muy grandes, con complejas estructuras metálicas sometidas a grandes fatigas térmico-mecánicas.

A raíz de las investigaciones en repetición de incidencias y costes asociados, se concluyó que no se deben sobrepasar las 10 incidencias/año en *Fuga de Cierre*; ya que si no se perjudica gravemente la rentabilidad de la gestión de mantenimiento, reflejándose en el descuadre del presupuesto de mantenimiento. Por ello, 22 incidencias en fuga por el cierre, es un valor muy elevado aunque este en amarillo; es así, ya que en los datos del estudio existen bombas con mayor cantidad de incidencias/año que ésta y fue necesario poner el límite elevado.

A nivel tecnológico, no debe preocupar en exceso la gran cantidad de intervenciones del rango 0-1.200 euros, puesto que le generan un % coste total de mantenimiento de las bombas relativamente bajo. Pero, si que debe preocupar en el campo de la gestión, puesto que la tramitación de una orden de trabajo para que mantenimiento intervenga, tiene un coste no reflejado en este estudio. Dicho coste es el de las personas que gestionan la OT (orden de trabajo) y que normalmente forman parte de la plantilla fija de la compañía.

Lo que es muy relevante, aunque puede pasar inadvertido es que algo más de un 3 % de los reactores, hay que intervenir más de 50 veces/año para su mantenimiento. También la misma reflexión que en el caso de las bombas.

La gráfica 10.11 muestra la comparativa entre el % coste y % incidencias para mantener los reactores. Como se puede observar, en el rango >6.000 euros, pocas incidencias causan un gasto elevado a mantenimiento, es aquí donde hay que analizar las causas de estos elevados costes.

Es importante configurar unas tablas bien organizadas para poder visualizar de forma rápida, cuáles son los activos que consumen mayor coste y ocurren mayor número de incidencias repetitivas en un periodo de tiempo establecido. Con la herramienta denominada mapa o "mapping" se puede confeccionar las tablas mencionadas.

# 11

## CONCLUSIONES

Se definen las conclusiones de la presente tesis doctoral, estructurado por puntos de desarrollo y aportación

A la metodología RCM, con sus secciones criticidad, AMFEC y NPR; al Mantenimiento Preventivo y Predictivo; y a los indicadores de gestión se les ha encontrado necesidades de desarrollo de algunas de sus partes, para facilitar la implantación de la gestión de activos en industrias de procesos.

La definición de la metodología RCM en la actualidad, muestra la potencia de analizar los modos de fallos de un activo, siendo los niveles de desarrollo los que se quieran, no recomendado más de 3. La valoración del riesgo (NPR), por modo de fallo necesita más tiempo de análisis mayor que valorar de forma global el riesgo de un activo; pero, da información más precisa y fiable de cada modo de fallo, pudiendo variar mucho su impacto en riesgo de un modo de fallo a otro. Las diferentes metodologías mostradas, la estrategia SAMI (Strategic Asset Management Inc), el modelo BMM (Business Maintenance Model) de Asset Management de PMM Institute For Learning y el modelo de implantación de Mantenimiento Preventivo y Predictivo, diseñado por el autor de la tesis; indican que es posible diseñar maneras diferentes de gestionar los activos, todo depende de la habilidad de los diseñadores de métodos en crearlos.

Definir un protocolo de implantación de las mejoras del método RCM ayuda a visualizar como se quiere trabajar paso a paso, para conseguir los resultados deseados. Los 4 primeros pasos no aportan valor al desarrollo de la implantación;

pero, ayudan a situar el activo en la definición de su identidad geográfica, sector industrial, tipo de equipo, etc., para estructurar los activos que se están estudiando. Los siguientes pasos, aportan mejoras al método RCM, Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión, realimentando el sistema con las salidas de toma de decisiones.

Se ha definido y formalizado una forma de cuantificar la estructuración de activos, creando sistemas y grupos de sistemas de activos, que definen características similares para implantar más adecuadamente RCM.

De los tres métodos para calcular la criticidad, el más idóneo es el de ponderación de características de equipos; ya que permite más flexibilidad en la precisión de los resultados según se tome una u otra población de variables puestas en juego. Los otros dos métodos son más pragmáticos y necesitan menos recursos para llegar a unos resultados; son válidos para utilizarlos en entornos industriales donde hay una elevada presencia de características singulares de gran impacto. Se ha aportado un gran valor con esta parte de la tesis doctoral, ya que se ha desarrollado una herramienta rigurosa y potente para definir la criticidad y con ello la prioridad de activos industriales.

El desarrollo de bases de datos de modos de fallos, definiendo frecuencia de fallos y detectabilidad para varios tipos de equipo de industria de procesos, facilita el desarrollo de la hoja AMFEC. El trabajo realizado con el NPR, aporta herramientas versátiles de trabajar con éste, como son el NPR macroscópico y NPR microscópico; combinando con la personalización de ponderación y rangos NPR, dictamina una mejora sustancial en esta parte de la metodología RCM.

El Plan Estratégico de Mantenimiento, es muy útil para organizar las actividades de las diferentes tipologías de Mantenimiento Preventivo, desarrolladas en las hojas matriz de decisiones de los activos de estudio. Gracias a la confección de rutas de mantenimiento y a la valoración económica de cada actividad, se pueden comparar los costes de la implantación del Mantenimiento Preventivo con los presupuestos asignados.

Las incidencias de mantenimiento causan un gasto a las empresas que normalmente quieren reducir o eliminar bajo cualquier concepto. Es difícil demostrar las causas que provocan las averías en las máquinas, ya que están sometidas a muchos factores aleatorios relacionados con fiabilidades de aparición de roturas, desgastes, deterioros, etc. Como normalmente el mantenimiento no se considera un bien más de los activos de las empresas, no se realizan estudios profundos de causalidad, fiabilidad y repetitividad de incidencias. Se ha mostrado una forma de estudiar la aparición de incidencias iguales en equipos de planta procesos, que surgen de manera periódica y sin control, con el objetivo de reducirlas, controlarlas y sobretodo de controlar y cuantificar sus costes.

Una de las conclusiones a la que se llega es que existen muchas averías que surgen de forma repetida, a causa de la poca profundidad de estudio tecnológico cuando un equipo tiene un cierto nivel de vida. Además de mostrar un análisis exhaustivo de las incidencias aparecidas en la planta de estudio, se ha mostrado una comparativa entre la cantidad de incidencias aparecidas por equipos y el coste asociado a ellas. Se ha indicado que la relación de las incidencias con los costes asociados sigue la *Ley de Pareto*, puesto que el 80 % de las incidencias aparecidas cuestan el 20 % del coste de mantenimiento; así como, el 20 % de las incidencias más costosas, representan el otro 80 % del coste. Es en las incidencias más costosas en las que hay que incidir más, una vez detectados hay que aplicar soluciones tecnológicas y cuantificarlas económicamente para ver su rentabilidad tanto económica como técnica.

El presente estudio, ha reflejado el desarrollo de aportaciones a la metodología RCM, Mantenimiento Preventivo e indicadores de gestión; basándose en la estructura de dichos métodos y no reestructurándolos para poder encajar las aportaciones. Es por ello, que la línea de investigación futura es la continuación del desarrollo de estudios de criticidad, ampliación de bases de datos de modos de fallos, desarrollo del NPR variable en su vertiente macroscópica y definición de indicadores que detecten inoperancias de mantenimiento; tomando decisiones técnico-económicas para ajustar las ineficiencias de mantenimiento y conseguir una implantación óptima de la gestión de activos en la industria de procesos.



## REFERENCIAS

- [1] AEM, “El mantenimiento en España. Encuesta sobre su situación en las empresas españolas”. Asociación Española de Mantenimiento. 1.995.
- [2] Aghazadeh, F. *Advances in Industrial Ergonomics and Safety*. Taylor & Francis. 2004.
- [3] Ahmad, M.; Benson, R. *Benchmarking in the Process Industries*. Institution of Chemical Engineers (IChemE). 1999.
- [4] Alegre Espada, Miguel; García Ciaurri, Fernando; Tarres Ficapal, Josep. “Problemas de Series y Ecuaciones Diferenciales”. EUB, 1996.
- [5] Alexander, K. *Facilities Management: innovation and performance*. Taylor & Francis. 2004.
- [6] Amendola, L . *Dirección y Gestión de Paradas de Planta “THE THEORY OF CONSTRAINTS” ; Turnaround – Shutdowns Maintenance*. Espuela de Plata. Sevilla, 1999.
- [7] Amstadter, B. L., “Matemáticas de la Fiabilidad”. Editorial Reverté, S.A. 1.976.

- [8] Andersen, B.; Pettersen, P.G. The Benchmarking Handbook: Step-by-step Instructions. Springer. 1996.
- [9] Aragón Sánchez, A. Fundamentos de dirección y gestión de recursos humanos. Thomson Learning Ibero. 2004.
- [10] Aranguren, N. "DESCRIPCIÓN METODOLOGÍA AMFEC DE PRODUCTO Y AMFEC MEDIOS DE PRODUCCIÓN," 2003.
- [11] Arjona Torres , M. Dirección estratégica: Principios y aplicaciones de la gestión del rendimiento. Ediciones Díaz de Santos. 1999.
- [12] August, J. Applied Reliability Centered Maintenance. PennWell Books. 1999.
- [13] August, J. Rcm Guidebook: Building a Reliable Plant Maintenance Program. PennWell Books. 2004.
- [14] Ayres, Frank Jr.; Mendelson, Elliot. "Cálculo Diferencial e Integral". McGraw-Hill, 1997.
- [15] Backlund, F., Larsson, D. y Rhen, M., "Risk analysis and condition monitoring for efficient maintenance planning at Swedish hydropower plants". European Conference on Safety and Reliability. ESREL '98. Junio 1.998.
- [16] Barber, A. Handbook of Noise & Vibration Control. Elsevier. 1992.
- [17] Bautista, Joaquím; Companys, Ramón; Rúa, Carles; Mateo, Manuel; Ibáñez, José María. Transparencias de Organización Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona- Universidad Politécnica de Cataluña. 2001-2002.
- [18] Bazovsky, I., "Reliability Theory and Practice". Prentice Hall, Inc. 1.961.
- [19] Beebe, R.S. Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring. Elsevier. 2004.

- [20] Berman, J. Maximizing Project Value: Defining, Managing, and Measuring for Optimal Return. AMACOM Div American Mgmt Assn. 2007.
- [21] Bhote, K.R. World Class Reliability: Using Multiple Environment Overstress Tests to Make it Happen. AMACOM Div American Mgmt Assn. 2004.
- [22] Billinton, R., "Power System Reliability Evaluation". Gordon and Breach, Science Publishers. 1.970.
- [23] Billinton, R. y Allan, R. N., "Reliability Evaluation of Power Systems". Pitman Advanced Publishing Program. 1.984.
- [24] Birolini, A. Reliability Engineering: Theory and Practice. Springer. 2004.
- [25] Blanchard, B.S.; Peterson, E.L. Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management. Wiley-IEEE. 1995.
- [26] Blanchard, B. S. y Lowery, E. E., "Maintainability : Principles and Practices". McGraw-Hill Book Company. 1.969.
- [27] Blank, R. The Basics of Reliability. Productivity Press. 2004.
- [28] Blazey, M.L. Insights to Performance Excellence 2006: An Inside Look at the 2006 Baldrige Award Criteria. ASQ Quality Press. 2006.
- [29] Blischke, W.R.; Prabhakar Murthy, D.N. Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization. Wiley-IEEE. 2000.
- [30] Blischke, W.R.; Prabhakar Murthy, D.N. Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization. Wiley-IEEE. 2000.
- [31] Bloch, H.P. Practical Machinery Management for Process Plants: Volume 1. Gulf Professional Publishing. 1998.
- [32] Bloch, H.P. Budris, A.R. Pump User's Handbook Life Extension. Marcel Dekker. 2004.

- [33] Bodunde Badiru, A. Handbook of Industrial and Systems Engineering. CRC Press. 2006.
- [34] Bradley Jones, R. Risk-Based Management: A Reliability Centered Approach. Gulf Professional Publishing. 1995.
- [35] Brauer, D.C.; Cesarone, J. Total Manufacturing Assurance: Controlling Product Reliability, Safety and Quality. CRC Press. 1991.
- [36] Breyfogle, F.W. Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods. John Wiley and Sons. 2003.
- [37] Briggs, M.; Atkinson, C. Strategies for Effective Maintenance: A Guide for Process Criticality Assessment Schedule Setting. Institution of Chemical Engineers (IChemE). 2000.
- [38] Brown, M.G. TPM: Collected Practices and Cases. Productivity Press. 2005.
- [39] Brumbach , M.E.; Clade, J.A. Industrial Maintenance. Thomson Delmar Learning. 2003.
- [40] Cable, J.H.; Davis, J.S. Key performance indicators for federal facilities portfolios: Federal Facilities Council . National Academies Press.
- [41] Campbell, J. Reyes-Picknell, J. Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management. Productivity Press. 2006.
- [42] Campbell, J. Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life Cycle Decisions. CRC Press. 2001.
- [43] Cartin, T.J. Principles and Practices of Organizational Performance Excellence. ASQ Quality Press. 1999.
- [44] Casal Fàbrega, Joaquim; Montiel Boadas, Helena; Planas Cuchi, Eulàlia; Vilchez Sánchez, Juan A. "Análisis del riesgo en instalaciones industriales". Ediciones UPC, 1999.

- [45] Center for Professional Advancement. Seminar on "Process Reliability and Risk Analysis for the Chemical, Refining, Petrochemical and Power Industries". Mayo 1.989.
- [46] Cerezo, C., "Organización y aplicación de herramientas RAMS en el ejército del aire". Seminario sobre el estado actual y perspectivas de las metodologías RAMS en la industria española. ICAI/Empresarios Agrupados. Febrero, 1.992.
- [47] Committee on Science; Engineering; Public Policy (U.S.). Experiments in International Benchmarking of U S Research. National Academies Press. 2000.
- [48] Contributor National Cooperative Highway Research Program Staff, American Association of State Highway and Transportation Officials Staff, Booz-Allen and Hamilton, Inc. Staff Guide for Customer-Driven Benchmarking of Maintenance Activities. 2004.
- [49] Cooper, B., "Maintenance strategy procedures development and implementation". 3rd International ESReDA Seminar on Equipment ageing and maintenance. Octubre 1.992.
- [50] Creus, A. Fiabilidad y Seguridad. Marcombo. 2005.
- [51] Crowe, D. Design for Reliability. CRC Press. 2001.
- [52] Cumo, M.; Naviglio, A. Safety Design Criteria for Industrial Plants. CRC Press. 1989.
- [53] Dale, B.G. Managing Quality. Blackwell Publishing. 2003.
- [54] Damelio, R. The Basics of Benchmarking. Productivity Press. 1995.
- [55] Davies, A. Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology. Springer. 1998.
- [56] Dekker, R. y Smith, M. A. J. "New developments in the optimisation of maintenance". European Conference on Safety and Reliability. ESREL'98. Junio 1.998.

- [57] Dekker, R. y Plasmeijer, R., "On the use of equipment criticality maintenance optimization and spare parts inventory control". European Conference on Safety and Reliability. ESREL '97. Junio 1.997.
- [58] Departamento de Ingeniería Mecánica. "Curso de doctorado Vibraciones Aleatorias y Análisis Espectral". Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona- Universidad Politécnica de Cataluña. 2005-2006.
- [59] Departamento de Ingeniería Química, "Curso de doctorado Análisis de Riegos y Accidentes en la Industria Química". Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona- Universidad Politécnica de Cataluña. 2004-2005.
- [60] Dhillon, B. Engineering Safety: Fundamentals, Techniques, Applications. World Scientific. 2003.
- [61] Dhillon, B. Reliability, Quality, and Safety for Engineers. Taylor & Francis. 2005.
- [62] Dhillon, B. Engineering Maintenance: A Modern Approach. CRC Press. 2002.
- [63] Dhillon, B. Maintainability, Maintenance, And Reliability for Engineers. CRC Press. 2006.
- [64] Dhillon, B. Engineering Maintainability:: How to Design for Reliability and Easy Maintenance. Gulf Professional Publishing. 1999.
- [65] Dhillon, B. Design Reliability: Fundamentals and Applications. CRC Press. 1999.
- [66] Dodman, K., "Reliability centered Maintenance minimizes costs and maximizes plant availability". Power Engineering International. Págs. 62-64. Mayo/Junio 1.997.
- [67] Dodson, B.L.; Nolan, D. Reliability Engineering Handbook. CRC Press. 1999.
- [68] Dohi, T.; Won Young Yun . Advanced Reliability Modeling: Proceedings of the 2004 Asian International Workshop (AIWARM 2004). World Scientific. 2004.

- [69] Dohi, T.; Won Young Yun . Advanced Reliability Modeling II: Reliability Testing and Improvement. World Scientific. 2006.
- [70] Doumeingts , G. Modelling Techniques for Business Process Re-Engineering and Benchmarking. Springer. 1997.
- [71] Dovich, R. Reliability Statistics. ASQ Quality Press. 1990.
- [72] Duffuaa, S.O. Planning and Control of Maintenance Systems: Modeling and Analysis. John Wiley
- [73] Egusquiza Estévez, Eduard. Comportamiento Dinámico de Máquinas Hidráulicas. Ediciones UPC, 2003.
- [74] Enos, D.D. Performance Improvement. CRC Press. 2000.
- [75] ERIN Engineering and Research, Inc., “Reliability-Centered Maintenance (RCM ) Training Workshop” . Mayo 1.995.
- [76] Falk, J. Probabilistic Reliability Engineering. Wiley-Interscience. 1995.
- [77] Faulkner, E.L. Handbook of Machinery Dynamics. CRC Press. 2001.
- [78] Fernández, A. J., “Aplicación de la metodología RCM a plantas industriales”. II Jornadas de Mantenimiento : La gestión de activos industriales como negocio. Diciembre 1.998.
- [79] Fernández, A. J., “Programa de optimización del mantenimiento : Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad ( RCM )”. VII Conferencia sobre Mantenimiento Industrial : Gestión integral de Mantenimiento. Institute for International Research. Septiembre 1.
- [80] Fitz-Gibbon, C.T. Performance Indicators. Multilingual Matters. 1990.
- [81] Francis, G.; Humphreys. I. Benchmarking an international journal: Benchmarking in Health I. Emerald Group Publishing.

- [82] Gaertner, J. P., "Risk-based analysis set to aid in O&M cost reductions". Power. Págs. 107-110. Septiembre-Octubre 1.996.
- [83] García Garrido, S. Organización y gestión integral de mantenimiento. Ediciones Díaz de Santos. 2003
- [84] Gardella, M. Incidencias en maquinaria de plantas químicas. Parte 1. Ingeniería y Gestión de Mantenimiento. Págs 31-41. Editorial Alcion. Madrid. Octubre 2006.
- [85] Gardella, M. Incidencias en maquinaria de plantas químicas. Parte 2. Ingeniería y Gestión de Mantenimiento. Págs 27-35. Editorial Alcion. Madrid. Diciembre 2006.
- [86] Gardella, M. Incidencias en Maquinaria de Plantas Químicas. IGM, nº 49-50, editorial Alcion, Madrid 2006-2007
- [87] Gardella, M. Implantación y gestión de Mantenimiento preventivo en la Industria Química a través de RCM. PMM Project Magazine. Enero 2007.
- [88] Gardella, M. Mejora del método RCM a partir del AMFEC en Industrias Químicas. Parte 1. Ingeniería y Gestión de Mantenimiento. Págs 37-49. Editorial Alcion. Madrid. Diciembre 2005.
- [89] Gardella, M. Mejora del método RCM a partir del AMFEC en Industrias Químicas. Parte 2. Ingeniería y Gestión de Mantenimiento. Págs 36-48. Editorial Alcion. Madrid. Febrero 2006.
- [90] Gardella, M. Mejora del método RCM a partir del AMFEC en Industrias Químicas. Parte 3. Ingeniería y Gestión de Mantenimiento. Págs 40-49. Editorial Alcion. Madrid. Abril 2006.
- [91] Gardella, M; Egusquiza, E; Goti, A. Maintenance Managers' Empowerment by using a Money Based RCM. Conferences Proceedings Book. IADAT. Julio 2006
- [92] Gdoutos, E.E.; Rodopoulos, C.A.; Pilakoutas, K. Failure Analysis of Industrial Composite Materials. McGraw-Hill Professional. 2000.

- [93] Geitner, Fred K.; Bloch, H.P. Machinery Component Maintenance and Repair: Volume 3 : Machinery Component Maintenance and Repair. Gulf Professional Publishing. 1990.
- [94] Goldman, S. Vibration Spectrum Analysis: A Pratical Approach. Industrial Press Inc. 1999.
- [95] González, F. J. Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado, 1 ed. Madrid: Ed. Fundación confemetal, 2003.
- [96] González, J. y Fernández de Mata, R., "Plan de optimización del mantenimiento". Nuclear España. Págs. 25-27. Febrero 1.998.
- [97] Goti, A. ; A. I. Sánchez, and J. L. Astoreka, "Modelo Económico de Mantenimiento (I)," Madrid: Ed. Alción, 2004.
- [98] Goti, A.; A. I. Sánchez, A. San Miguel Ugarte, and N. Aranguren, "Productive efficiency improvement by using predictive maintenance based on the sound wave digitalization," Bilbao: 2004, pp. 260-266.
- [99] Goti, A.; A. I. Sánchez, and J. L. Astoreka, "Modelo económico de mantenimiento (II): Hablemos de dinero," Madrid: Ed. Alción, 2004.
- [100] Goti, A.; A. I. Sánchez, and J. L. Astoreka, "Modelo económico de mantenimiento (III): Hablemos de Proyectos," Madrid: Ed. Alción, 2004.
- [101] Goti, A.; A. I. Sánchez, and J. C. Agirre, "Aplicación de un modelo económico de mantenimiento mediante el Desarrollo y testado de una metodología de mantenimiento predictivo por ondas de sonido," Madrid: VI Congreso Nacional de Fiabilidad, 2004.
- [102] Goti. A; Sánchez, A; Gardella, A. OPERATIONS IMPROVEMENT AND OPERATORS EMPOWERMENT BY USING A RCM ORIENTED TO LEAN-STRUCTURED COMPANIES. Conferences Proceedings Book. IADAT. Julio 2006

- [103] Greenberg, H.R.; Cramer, J.J. Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry. John Wiley and Sons. 1991.
- [104] Grupo Mantecnología . Ingeniería de Planta S.L., Seminario Indicadores de Gestión y Rentabilidad. 2004.
- [105] Grupo Mantecnología - Ingeniería de Planta S.L., Seminario de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad R.C.M. 2004.
- [106] Hansen, G.K.; Sandtorv, H.A.; Lydersen, S. Safety and Reliability: Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, ESREL. Taylor francis (UK). 1998.
- [107] Hansen, R.C. Overall Equipment Effectiveness: a powerful production/maintenance tool for increased profits. Industrial Press Inc. 2002.
- [108] Hantek, E.R. Practical Reliability of Electronic Equipment and Products. CRC Press. 2003.
- [109] Harris, M. J. y Moss, T. R., "Practical RCM Analysis and its information requirements". 6th International ESReDA Seminar on Maintenance and System Effectiveness. Abril 1.994.
- [110] Hartford, D.N.D.; Baecher, G.B. Risk And Uncertainty In Dam Safety. Thomas Telford. 2004.
- [111] Hawkins, B.; Kister, T.C. Maintenance Planning and Scheduling: Streamline Your Organization for a Lean Environment. Elsevier. 2006.
- [112] Heaton, C.A. The Chemical Industry. Springer. 1994.
- [113] Hecht, H. Systems reliability and failure prevention. Artech House.
- [114] Held, G. Enhancing Lan Performance. CRC Press. 2004.
- [115] Heldt, J.J. Quality Sampling and Reliability: New Uses for the Poisson Distribution. CRC Press. 1998.

- [116] Heredia, J.A. La gestion de la fabrica: Modelos para mejorar la competitividad. Ediciones Díaz de Santos. 2004.
- [117] Holmberg, K. Operational Reliability and Systematic Maintenance. CRC Press. 1991.
- [118] Hywel, J; Drake, P.R.; Davies, A. Condition-Based Maintenance and Machine Diagnostics. Springer. 1994.
- [119] IEEE Robotics and automation society Proceedings 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE. 1996.
- [120] Institute of Electrical and Electronics Engineers Professional Technical Group on Reliability, IEEE Reliability Society IEEE Transactions on Reliability. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1963.
- [121] Institution of Mechanical Engineers (Great Britain). Fluid Machinery Group, IMechE (Institution of Mechanical Engineers), Fluid Machinery Group Staff Centrifugal Pumps: The State Of The Art And New Developments; 22 September 2004. John Wiley and Son
- [122] Ireson, W.G.; Moss, R.Y. Handbook of Reliability Engineering and Management. McGraw-Hill Professional. 1995.
- [123] Jardine, A. K. S. "Optimizing Maintenance and Replacement Decisions," in Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions, 1 ed. J. D. Campbell and A. K. S. Jardine, Eds. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [124] Jardine, A.K.S.; Tsang, H.C. Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications. CRC Press. 2006.
- [125] Joint Commission. Resources Failure Mode and Effects Analysis in Health Care: Proactive Risk Reduction. Joint Comisión Resources. 2005.
- [126] Joint Commission Resources. Benchmarking in Health Care: Finding and Implementing Best Practices. Joint Commission Resources. 1998.

- [127] Joint Commission Resources Failure Mode and Effects Analysis in Health Care: Proactive Risk Reduction. Joint Comisión Resources. 2005.
- [128] Jones, R. B., "Application of Reliability-Centered Maintenance". First International Conference on Plant Reliability for Petroleum Refineries, Chemical and Natural Gas Plants. Gulf Publishing Company & Hydrocarbon Processing.
- [129] Juran, J. M. And Gryna, F. M. "Juran's quality control handbook". McGraw-Hill, New York, 1998.
- [130] Juran, J.M. Juran y la planificación para la calidad. Ediciones Díaz de Santos. 1990.
- [131] Kalal, T.T.; Levin, M. Improving Product Reliability: Strategies and Implementation. John Wiley and Sons. 2003.
- [132] Kececioglu , D. Reliability and Life Testing Handbook: V. 1. DEStech Publications, Inc. 2002.
- [133] Kececioglu, D.; Feng-bin Sun. Environmental Stress Screening: Its Quantification, Optimization, and Management. DEStech Publications, Inc. 2003.
- [134] Kelly, A. Benchmarking for School Improvement: Practical Guide for Comparing and Achieving Effectiveness. Routledge. 2001.
- [135] Kelly, A. Strategic Maintenance Planning. Elsevier. 2006.
- [136] Kenyon, R. Process Plant Reliability and Maintenance for Pacesetter Performance. PennWell Books. 2004.
- [137] Kerszenbaum, I; Klempner, G. Operation and Maintenance of Large Turbo-Generators. Wiley-IEEE. 2004.
- [138] Kimber, R.J.; Grenier, R.W.; Heldt, J.J. Quality Management Handbook. Marcel Dekker. 1997.

- [139] Kirkham, R.L.; Boussabaine, A. Whole Life-Cycle Costing: Risk and Risk Responses. Blackwell Publishing. 2004.
- [140] Kusiak , A. Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques. Wiley-Interscience. 1993.
- [141] Kyōkai, N.P.M. Tpm for Every Operator. Productivity Press. 1996.
- [142] Latino, R.; Latino, K. Root Cause Analysis: Improving Performance for Bottom Line Results. CRC Press. 2002.
- [143] Lazor, J. D. "Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA) (Success Tree Analysis-STA)," in Handbook of reliability engineering and management, 2 ed. W. Grant Ireson, C. F. Jr. Coombs, and R. Y. Moss, Eds. New-York: McGraw
- [144] Legát, V.; V. Jurca, and T. Hladík, "Money Centered Maintenance," Barcelona: AEM, 2004.
- [145] Levitt, J.; Nyman, D. Maintenance Planning, Scheduling, and Coordination. Industrial Press Inc. 2001.
- [146] Levitt, J. The Handbook of Maintenance Management. Industrial Press Inc. New York, 1997.
- [147] Levitt, J. Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance. Industrial Press Inc. 2003.
- [148] Levitt, J. Managing Factory Maintenance. Industrial Press Inc. 2004.
- [149] Lezana, E., "Medida y control de la eficiencia del mantenimiento preventivo". Ingeniería Química. Págs. 88-90. Septiembre 1.989.
- [150] Lezana, E., "RCM después de TPM". Mantenimiento. Págs. 39-45. Enero-Febrero 1.995.

- [151] Loganathanaraj, R.; Palm, G.; Ali, M. Intelligent Problem Solving: Methodologies and Approaches. Springer. 2000.
- [152] Lydersen, S. Hansen, G.K.; Sandtorv, H.A. Safety and Reliability: proceedings of the ESREL 98 conference Trondheim, Norway, 16-19 June 1998. Taylor & Francis. 1998.
- [153] Lyonnet, P. Los metodos de la calidad total. Ediciones Díaz de Santos. 1989.
- [154] MacDermott , R.E.; Mikulak, R.J.; Beauregard, M.R. The Basics of FMEA. Productivity Press. 1996.
- [155] MacGarvey, B. Hannon, B.M. Dynamic Modeling for Business Management: An Introduction. Springer. 2004.
- [156] MacNaughton, D.; Dietz, C.T.; Carlson, D.G. Banking Institutions in Developing Markets. World Bank Publications. 1992.
- [157] Maintenance Planning and Scheduling Handbook. McGraw-Hill Professional. 1999.
- [158] Martínez, F., "Viabilidad y rentabilidad del mantenimiento predictivo aplicado a equipos dinámicos". 3er Congreso Español de Mantenimiento. Marzo 1.984.
- [159] Martínez, D.; Milla Gutiérrez, A. La elaboracion del Plan Estrategico y su implantacion a traves del cuadro de mando integral. Ediciones Díaz de Santos. 2005.
- [160] Mather, D. The Maintenance Scorecard: Creating Strategic Advantage. Industrial Press Inc. 2005.
- [161] Mather, D. Cmms: A Timesaving Implementation Process. CRC Press. 2003.
- [162] Matos, R.; International Water Association Performance Indicators for Wastewater Services. McGraw-Hill Professional. 2003.

- [163] McCormick, N. J., "Reliability and Risk Analysis : Methods and Nuclear Power Applications". Academic Press, Inc. 1.981.
- [164] McEvily, A.J. Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention. Wiley-IEEE. 2001.
- [165] McNulty , G.J. Quality, Reliability and Maintenance QRM 2002: QRM 2002. John Wiley and Sons. 2002.
- [166] Melchers, R.E.; Stewart, M.G. Probabilistic Risk Assessment of Engineering Systems. Springer. 1997.
- [167] Membrana, J. Innovación y mejora continua según el modelo EFQM de excelencia. Ediciones Díaz de Santos. 2002.
- [168] Merli, G. La gestion eficaz. Ediciones Díaz de Santos. 1997.
- [169] Miranda, R.A.; Picur, R.D.; Government Finance Officers Association Benchmarking and Measuring Debt Capacity. GFOA. 2000.
- [170] Mobley, K. An Introduction to Predictive Maintenance. Elseiver. 2002.
- [171] Mobley, R. Root Cause Failure Analysis. Elseiver. 1999.
- [172] Mobley, R.K. Total Plant Performance Management: A Profit-Building Plan to Promote. Gulf Professional Publishing. 1999.
- [173] Modarres, M. Reliability Engineering and Risk Analysis. CRC Press. 1999.
- [174] Motwani , J.; Sower, V.E. Benchmarking in Services. Emerald Group Publishing. 2006.
- [175] Moubray, J., "Estrategias del mantenimiento. Un nuevo paradigma". Mantenimiento. Págs. 39-52. Noviembre 1.997.
- [176] Moubray, J. Reliability-Centered Maintenance. Industrial Press Inc. 2001.

- [177] Muñoz, J.R. La gestión integrada: Calidad, seguridad y medio ambiente. SERFOREM,S.L. 2004.
- [178] Murray, R. Spiegel; Abellanas, Lorenzo. “ Fórmulas y Tablas de Matemática Aplicada”. McGraw-Hill, 1999.
- [179] Muszyńska, A. Rotordynamics. CRC Press. 2005.
- [180] Nakajima, S., Introduction to TPM, Productivity Press, Cambridge, MA, 1998.
- [181] Narayan, V. Effective Maintenance Management: Risk and Reliability Strategies for Optimizing Performance. Industrial Press Inc. 2004.
- [182] Niebel, B.W. Engineering Maintenance Management. CRC Press. 1994
- [183] O'Connor, P.D.T. Practical Reliability Engineering. John Wiley and Sons. 2002.
- [184] Oliver, K.G. Basic Industrial Electricity: A Training and Maintenance Manual. Industrial Press Inc.. 1990.
- [185] Onisawa, T.; Kacprzyk, J. Reliability and Safety Analyses Under Fuzziness. Springer. 1995.
- [186] Ortiz, S.R. Vision y Gestion Empresarial:cómo articular las estrategias y el capital humano. Thomson Learning Ibero. 2003.
- [187] Özekici , S. Reliability and Maintenance of complex Systems. Springer. 1996.
- [188] Pahl. G.; Beitz, W. Engineering Design: A Systematic Approach. Springer. 1996.
- [189] Palmer, R.D. Maintenance Planning and Scheduling Handbook. McGraw-Hill Professional. 2006.
- [190] Parena, R.; Smeets, E.; Troquet, I.; Larsson, M. Process Benchmarking in the Water Industry. IWA Publishing. 2002.

- [191] Pecht, M. Product Reliability, Maintainability, and Supportability Handbook . CRC Press. 1995.
- [192] Pérez Moya , J. Estrategia gestion y habilidades directivas: Un manual para el nuevo directivo. Ediciones Díaz de Santos. 1996.
- [193] Petersen, K.E.; Rasmussen, B. Safety and Reliability '92: European Safety and Reliability Conference '92, Copenhagen, Denmark. CRC Press. 1992.
- [194] Pham, H. Handbook of Reliability Engineering. Springer. 2003.
- [195] Press, D. Guidelines for Failure Modes and Effects Analysis for Medical Devices. CRC Press. 2003.
- [196] Press, D. Guidelines for Failure Mode and Effects Analysis for Automotive, Aerospace. CRC Press. 2002.
- [197] Pyzdek, T. The Six Sigma Project Planner: A Step-by-step Guide to Leading a Six Sigma Project Through DMAIC. McGraw-Hill Professional. 2003.
- [198] Ramachandran, V. Failure Analysis of Engineering Structures: Methodology and Case Histories. ASM Internacional. 2005.
- [199] Rausand, M.; Høyland, A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. Wiley-IEEE. 2004.
- [200] Reliability Theory: With Applications to Preventive Maintenance . Springer. 2000.
- [201] Reliability Centered Maintenance (RCM) Guide: Operating a More Effective Maintenance Program . DIANE Publishing
- [202] ReVelle, J.B. Quality Essentials: A Reference Guide from A to Z. ASQ Quality Press. 2004.
- [203] Rey, F., “La gestión de la mejora continua en el mantenimiento”. 10º Congreso Iberoamericano de Mantenimiento. Septiembre 1.998.

- [204] Rolstadås, A. Performance Management: A Business Process Benchmarking Approach. Springer. 1995.
- [205] Roush, M.L.; Webb, W.M. Applied Reliability Engineering. RIAC. 2000.
- [206] Ruiz, J. M., "Análisis de los costes de mantenimiento". VIII Jornadas de ENERGÍA sobre Aspectos innovativos del mantenimiento en CC.TT. Energía. Págs. 30-36. Marzo-Abril 1.995.
- [207] Salgueiro, A. Indicadores de gestión y cuadro de mando. Ediciones Díaz de Santos. 2001.
- [208] Schooman, M. L., "Probabilistic Reliability : An engineering approach". McGraw Hill, Inc 1.968.
- [209] Schores, S. P., "Reliability-centered maintenance and its turnaround applications". Chemical Processing. Marzo 1.997.
- [210] ScienceDirect. Microelectronics and Reliability. Pergamon Press. 1964.
- [211] Shiraishi, N.; Shinozuka, M.; Yi-Kwei Wen. Structural safety and reliability: proceedings of ICOSSAR '97. Taylor francis (UK). 1998.
- [212] Shirose, K. TPM Team Guide. Productivity Press. 1995.
- [213] Shives, T.R.; Mechanical Failures Prevention Group Meeting. Advanced Technologies in Failure Prevention: Proceedings of the 43rd Meeting of the Mechanical. Cambridge University Press. 1991.
- [214] Short, T.A. Distribution Reliability and Power Quality. CRC Press. 2005.
- [215] Shukla, R.C. Industrial Insurance and Loss Prevention. Tata McGraw-Hill Pub. Co. 1987.
- [216] Skelton, B. Process Safety Analysis: An Introduction. Institution of Chemical Engineers (IChemE). 1997.

- [217] Smith, A. M., "Reliability-Centered Maintenance". McGraw-Hill, Inc. 1.993.
- [218] Smith, D.J. Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers. Newnes. 2001.
- [219] Smith. H.; Armstrong, M.; Brown, S. Benchmarking and Threshold Standards in Higher Education. Routledge. 1999.
- [220] Society of Chemical Industry (Great Britain). Reports on the Progress of Applied Chemistry. Society of Chemical Industry.1946.
- [221] Sotskov, B. "Fundamentos de la teoría y del cálculo de Fiabilidad". Editorial MIR. 1.972.
- [222] Souris, J. P. "Méthodes et outils au service de la disponibilité des équipements de production," Beauvais, 1988.
- [223] Souris, J. La Maintenance, source de profits. L'es éditions d'organisation. 1990.
- [224] Souris, J.P. El mantenimiento, fuente de beneficios. Ediciones Díaz de Santos. 1992.
- [225] Spellman, F.R.; Drinan, J. Pumping. CRC Press. 2001.
- [226] Stamatis, D.H. Failure Mode and Effect Analysis: : FMEA from Theory to Execution. ASQ Quality Press. 2003.
- [227] Stellfox, D., "Reliability-Centered Maintenance business seen growing in future". Nucleonics Week. Septiembre 1.991.
- [228] Suzuki, T. TPM in Process Industries. Productivity Press. 1994.
- [229] Szabo, M.J.; Van Hardeveld, T. Pipeline Operation & Maintenance: A Practical Approach. ASME Press. 2004.
- [230] Taylor, G. M., "San Onofre : Using RCM to optimize preventive maintenance". Nuclear News. Págs. 49-56. Noviembre 1.989.

- [231] The Effects of Equipment Age on Mission Critical Failure Rates: A Study of M1 Tanks .
- [232] Thomas, S.J. Improving Maintenance and Reliability Through Cultural Change. Industrial Press Inc. 2005.
- [233] Tobias, P.A.; Trindade, D.C. Applied Reliability. CRC Press. 1995.
- [234] Tomic, B., "Risk-based optimization of Maintenance - Methods and approaches". European Conference on Safety and Reliability. ESREL '93. 1.993.
- [235] Tomlison, P. Effective Maintenance: The Key to Profitability : A Manager's Guide to Effective Industrial... John Wiley and Sons. 1993.
- [236] Totten, G.E.; Wills, D.K.; Feldmann, D.K. Hydraulic Failure Analysis: Fluids, Components, and System Effects. ASTM Internacional. 2001.
- [237] Tweeddale, M. Managing Risk and Reliability of Process Plants. Gulf Professional Publishing. 2003.
- [238] UNE 20 812. "Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos ( AMFE )". Marzo 1.995.
- [239] UNE 200001-3-1. "Gestión de la Confiabilidad. Parte 3 : Guía de aplicación. Sección 1. Técnicas de análisis de la Confiabilidad : Guía metodológica". Enero 1.998.
- [240] UNE 21 925. "Análisis por árbol de fallo ( AAF )". Diciembre 1.994.
- [241] UNE-EN 60300-1. "Gestión de la Confiabilidad. Parte 1 : Gestión del programa de confiabilidad". Septiembre 1.996.
- [242] UNE-EN 60300-2. "Gestión de la Confiabilidad. Parte 2 : Elementos y tareas del programa de confiabilidad". Diciembre 1.997.
- [243] UNE-EN 61078. "Técnicas de análisis de la confiabilidad. Método del diagrama de bloques". Septiembre 1.996.

- [244] United States Federal Transit Administration; Turnbull, K.F. Performance Measures to Improve Transportation Systems: Summary of the Second National Conference. Transportation Research Board. 2005.
- [245] Van der Zee, H.T.M. Measuring the Value of Information Technology. Idea Group Inc (IGI). 2002
- [246] Vance, J.M. Rotordynamics of Turbomachinery. Wiley-IEEE. 1988.
- [247] Venezia, F.W.; Transit Development Corporation, Transit Cooperative Research Maintenance Productivity Practices. Transportation Research Board. 2004.
- [248] Verdú, V., "Indicadores de explotación". Revista de la Sociedad Nuclear Española. Págs. 17-20. Abril 1.988.
- [249] Viswanadham, P. Failure Modes and Mechanisms in Electronic Packages. Springer. 1998.
- [250] Warleta, J., "Fiabilidad. Bases teóricas y prácticas". Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. 1.973.
- [251] Wiggers, P.; Kok, H.; De Boer-De Witt, M. IT Performance Management. Elsevier. 2003.
- [252] Willmot, P.; McCarthy, D. TPM -: A Route to World Class Performance. Newnes. 2000.
- [253] Wireman, T. Benchmarking Best Practices in Maintenance Management. Industrial Press, New York, 2004.
- [254] Wireman, T. Developing Performance Indicators For Managing Maintenance. Industrial Press Inc. 2005.
- [255] Wireman, T. Maintenance Management and Regulatory Compliance Strategies. Industrial Press Inc. 2003.
- [256] Wireman, T. Inspection and Training for Tpm. Industrial Press Inc. 1992.

- [257] Wolstenholme, L.C. Reliability Modelling: A Statistical Approach. CRC Press. 1999.
- [258] Worledge, D. H., "Industry advances in Reliability-Centered Maintenance". European Safety and Reliability Conference. ESREL'93. 1.993.
- [259] Wowk, V. Machinery Vibration: Measurement and Analysis. McGraw-Hill Professional. 1991.
- [260] Zairi, M. Effective Benchmarking: Learning from the Best. Springer. 1996.
- [261] Zairi, M. Benchmarking for Best Practice: continuous learning through sustainable innovation. Elsevier. 1998.
- [262] Zairi, M. Effective Management of Benchmarking Projects: Practical Guidelines and Examples of Best Practice. Elsevier. 1998.
- [263] Zairi, M.; Léonard, P. Practical Benchmarking: The Complete Guide. Springer. 1994.
- [264] Zapata, J. L. y Rolán, J., "Strategies for improving availability and reliability in power plants". POWER GEN'95. 1.995.
- [265] Zhu, J. Quantitative Models for Performance Evaluation and Benchmarking. Springer. 2003.

## ANEXO I: NOMENCLATURA

### Latinas

- $A$  : Año.
- $a$  : Coeficiente de tipo de rodamientos; 3 para rígidos de bolas.
- $a_i$  : Número de grupo de los sistemas de un nivel  $S_i$ .
- $A_{S_i d_i}^C$  : Aspectos operativos de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $b_i$  : Número de aspecto legal de sistemas del nivel  $i$ .
- $C_{10}$  : Carga clasificada del rodamiento en kN.
- $C_{A^C}$  : Cantidad de aspectos operativos de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

- $C_{A_{S_i}}^C$  : Cantidad de aspectos operativos de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{aaabacad}^{IG}$  : Coste de mantenimiento de una incidencia dada en un equipo.
- $C_{aaabad}^{IG}$  : Coste de mantenimiento de tipo de incidencia para todos los equipos, incidencias y tipos de incidencias.
- $C_{abacad}^{IG}$  : Coste de mantenimiento de tipo de equipo para todos los equipos, incidencias y tipos de incidencias.
- $C_{B_{acad}}^{IG}$  : Coste de incidencia ocurrida en una bomba.
- $C_{B_{ad}}^{IG}$  : Coste de incidencia en una bomba y tipo de incidencia.
- $C_{BASE2}^C$  : Valor indicativo de la dispersión del método *Base2* respecto los demás.
- $C_{C_{MF}}$  : Cantidad de aspectos clasificaciones de modos de fallos de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{C_{S_i}^{MF}}$  : Cantidad de clasificaciones de modos de fallos de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{E_{ad}}^{IG}$  : Coste medio por tipo de equipo.
- $C_{E_{ad}}^{MP}$  : Coste de la Ruta de Mantenimiento Preventivo de una frecuencia y tipo de equipo dado.
- $C_{G_i^E}$  : Cantidad de grupos de los sistemas de un nivel  $S_i$ .

- 
- $C_{I^c}$  : Cantidad de niveles de impacto de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{I_{Si}^c}$  : Cantidad de niveles de impacto de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_I^{IG}$  : Cantidad de incidencias ocurridas en una planta industrial.
- $\overline{C}_{I^{IG}}$  : Coste medio por tipo de incidencia.
- $C_{I^{MP}}$  : Coste de intervención.
- $C_{I^{MP}}$  : Coste de los consumibles (tornillos, juntas, arandelas, conectores, etc.) utilizados en la intervención en €.
- $C_{IB^{IG}}$  : Cantidad de incidencias ocurridas en una bomba para todos los tipos de incidencias.
- $C_{IR^{IG}}$  : Cantidad de incidencias ocurridas en un reactor para todos los tipos de incidencias.
- $C_{L^c}$  : Cantidad de aspectos legales de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{L_{Si}^c}$  : Cantidad de aspectos legales de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{LOGARÍTMICA}^c$  : Valor indicativo de la dispersión del método *Logarítmica* respecto los demás.
- $C_{L^c}^M$  : Cantidad de aspectos legales de todos los niveles, por sistemas, de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

- 
- $C_{L_{S_{ij}}}^M$  : Cantidad de aspectos legales de cada nivel y cada sistema susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{N_{S_i}^A}$  : Cantidad de grupos de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{N_{S_i}^L}$  : Cantidad de niveles de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{N_{S_i}^T}$  : Cantidad de grupos de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{P^C}$  : Cantidad de puntos críticos de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{P_{S_i}^C}$  : Cantidad de puntos críticos de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{PRIMOS}^C$  : Valor indicativo de la dispersión del método *Números Primos* respecto los demás.
- $C_{P^C}^M$  : Cantidad de puntos críticos de todos los niveles, por sistemas, de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{P_{S_{ij}}}^M$  : Cantidad de puntos críticos de cada nivel y cada sistema susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{P}^{MP}$  : Coste de la Ruta de Mantenimiento Preventivo de una frecuencia y planta dada.
- $C_{R}^{IG acad}$  : Coste de incidencia ocurrida en un reactor.

- 
- $C_{R\ ad}^{IG}$  : Coste de incidencia en una bomba y tipo de incidencia.
- $C_S$  : Cantidad total de sistemas susceptibles de aplicar la metodología RCM.
- $C_{SC_{TC}}$  : Cantidad de variables de criticidad de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{S_i}$  : Cantidad de sistemas de un nivel  $S_i$  susceptibles de aplicar la metodología RCM.
- $C_{S_i C_{TC_{S_i}}}$  : Cantidad de variables de criticidad de cada tipo de característica por cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{S_i C_{M_{S_i}^E}}$  : Cantidad de rangos inferiores y superiores de tipos de características de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_S^{G^E}$  : Cantidad total de sistemas susceptibles de aplicar la metodología RCM para todos los grupos y niveles.
- $C_{S_i}^{G_i^E}$  : Cantidad de sistemas de un nivel  $S_i$  susceptibles de aplicar la metodología RCM para todos los grupos  $G^E$  del nivel  $S_i$ .
- $C_{S_i}^{G_{ia_i}^E}$  : Cantidad de sistemas de un nivel  $S_i$  susceptibles de aplicar la metodología RCM para un grupo  $G^E$  del nivel  $S_i$ .
- $C_{S_i}^{MF}$  : Cantidad de modos de fallos de cada clasificación de modo de fallo, por cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

- $C_{S_i q_i}^{MF}$  : Clasificaciones de modos de fallos de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{T^C}$  : Cantidad de tipos de características de todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_{T_{S_i}^C}$  : Cantidad de tipos de características de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $C_T^{IG}$  : Coste de mantenimiento de todas las incidencias ocurridas en un centro industrial o productivo.
- $C_{TB}^{IG}$  : Coste de incidencias ocurridas en una bomba para todos los tipos de incidencias.
- $C_{TE}^{MP}$  : Coste total de Mantenimiento Preventivo por tipo de equipos.
- $C_{TP}^{MP}$  : Coste total de Mantenimiento Preventivo por plantas.
- $C_{TR}^{IG}$  : Coste de incidencias ocurridas en un reactor para todos los tipos de incidencias.
- $c_i$  : Número de punto crítico de sistemas del nivel  $i$ .
- D : Día.
- $D^{NPR_{MACRO}}$  : Detectabilidad. Valorado de 1 a 10.
- $D_{(F_{C_{S_i q_i}^{MF}})}^{(U_{S_i q_i})}$  : Detectabilidad. Valor entero entre 1 y 10.
- $C_{T_{S_i k_i}^C}^{(U_{S_i k_i})}$  : Variables de criticidad de cada tipo de característica por cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

- $D_{\beta}^{NPR_{MICRO}}$  : Detectabilidad.
- $d_i$  : Número de aspecto operativo de sistemas del nivel  $i$ .
- $d_{\beta\alpha\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}}$  : Valor de detectabilidad (1...10).
- E : Eléctrico.
- $\tau_{T_{S_{ik}}^I}^I$  : Rangos inferiores de tipos de características de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $\tau_{T_{S_{ik}}^S}^S$  : Rangos superiores de tipos de características de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $E_{\kappa}^E$  : Especialidad aplicada en los sistemas de todos los niveles susceptibles de aplicar RCM.
- $E_{\rho\sigma}^{MP}$  : Valor 0 o 1 en el caso de que para la intervención y el equipo dado no se deba o si se deba actuar, respectivamente.
- $e_i$  : Número de nivel de impacto de sistemas del nivel  $i$ .
- F : Cantidad de métodos de valoración de variables de criticidad.
- $F^{NPR_{MACRO}}$  : Frecuencia de fallos. Valorado de 1 a 10.
- $\tau_{C_{S_{iq}}^{MF}}^C$  : Modos de fallos de clasificaciones de modos de fallos de niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $F_C^R$  : Cantidad de tipos de fiabilidad por tipos de características, para todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

---

$F_{C_{Siqi}}^{MF}$	: Frecuencia de Fallos. Valor entero entre 1 y 10.
$F_D$	: Carga radial del rodamiento en kN.
$F_o$	: Fuerza de empuje radial, en kN.
$F_o^A$	: Número de actuaciones anuales por frecuencia (ej. hay 365 actuaciones anuales de la frecuencia diaria y 0,2 de la frecuencia quinquenal).
$F_{\beta}^{NPR_{MICRO}}$	: Frecuencia de fallos.
$F_v^E$	: Tipo de frecuencias de intervención aplicado en los sistemas de todos los niveles susceptibles de aplicar RCM.
$f_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}}$	: Valor de frecuencia de fallos (1...10).
$G_{C_{Siqi}}^{MF}$	: Gravedad. Valor entero entre 1 y 10.
$G_i^E$	: Grupos con características similares de cada uno de los sistemas susceptibles de aplicar RCM para cada uno de los niveles.
$G_{\alpha}^{NPR_{MACRO}}$	: Gravedad de cada tipo de gravedad que afecta al modo de fallo concreto. Valorado de 1 a 10.
$G_{\beta}^{NPR_{MICRO}}$	: Gravedad.
$g_i$	: Número del nivel de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
$g_{\beta\gamma\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}}$	: Valor de gravedad (1...10).

---

Hm	: Altura manométrica (presión) a la cual es impulsado el fluido por la bomba en m.c.a. (metros de columna de agua).
$C_I^{MP}$	: Coste de las herramientas empleadas en la intervención en €.
$h_i$	: Número del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
I	: Instrumentación.
$I_I^{IG}$	: Vale 0 ó 1 según haya ocurrido ó no ocurrido incidencia del tipo de incidencia y del equipo en concreto. Dicho de otro modo, si existe OT (orden de trabajo) del tipo de incidencia y tipo de equipo dado aparecerá 1, sino 0.
$I_I^{IG}{}_{aaabad}$	: Número de incidencias para todos los tipos de equipo, equipos e incidencias.
$I_I^{IG}{}_{abacad}$	: Número de incidencias para todos los equipos, incidencias y tipos de incidencias.
$I_{IB}^{IG}{}_{acad}$	: Vale 0 ó 1 según haya ocurrido ó no ocurrido incidencia en una bomba.
$I_{IB}^{IG}{}_{ad}$	: Vale 0 ó 1 según haya ocurrido ó no ocurrido incidencia en una bomba y tipo de incidencia.
$I_{IR}^{IG}{}_{acad}$	: Vale 0 ó 1 según haya ocurrido ó no ocurrido incidencia en un reactor.
$I_{IR}^{IG}{}_{ad}$	: Vale 0 ó 1 según haya ocurrido ó no ocurrido incidencia en un reactor y tipo de incidencia.

---

$I_{S_i, e_i}^C$	: Niveles de impacto de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
$I_{\lambda}^E$	: Intervención aplicada en los sistemas de todos los niveles susceptibles de aplicar RCM.
Insp.	: Inspección.
$i$	: Niveles para estructurar los activos de una industria.
$j$	: Sistemas de cada uno de los niveles.
$k_i$	: Número del tipo de característica de sistemas del nivel $i$ .
$L_D$	: Vida deseada del rodamiento en horas.
$L_R$	: Vida nominal en horas del rodamiento.
$L_{S_i, b_i}^C$	: Aspectos legales de cada nivel y cada sistema susceptibles de aplicar RCM.
$l_{S_i, k_i}$	: Número de variable de criticidad de cada tipo de características por cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
M	: Mes.
$M_{C_I}^{C_I^{IG}}$	: Ratio entre el coste de mantenimiento y todas las incidencias de un centro industrial.
$M_{\varphi}^E$	: Tipo de mantenimiento aplicado en los sistemas de todos los niveles susceptibles de aplicar RCM.
$n_I^{MP}$	: Coste mano de obra en €/hora.

---

$m_{S_i k_i}$	: Número del rango inferior y rango superior del tipo de característica de sistemas del nivel $i$ .
$N$	: Cantidad de frecuencias de intervención.
$N_{ae}^{IG_I}$	: Nivel de severidad de la cantidad de incidencias.
$N_{af}^{IG_C}$	: Nivel de severidad de la cantidad de incidencias.
$N_{ag}^{IG_M}$	: Nivel de severidad de medias coste/incidencia.
$N_{ah}^{IG_B}$	: Nivel de severidad de la cantidad de incidencias de bombas.
$N_{ak}^{IG_{CB}}$	: Nivel de severidad de la cantidad de incidencias de bombas.
$N_{al}^{IG_R}$	: Nivel de severidad de la cantidad de incidencias de reactores.
$N_{am}^{IG_{CR}}$	: Nivel de severidad de la cantidad de incidencias de reactores.
$NPR_{\left( \begin{smallmatrix} F \\ C_{S_i q_i}^{MF} \end{smallmatrix} \right)_{u_{S_i q_i}}}$	: Número de Ponderación del Riesgo de un modo de fallos de clasificaciones de modos de fallos de niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
$NPR_{MACROSCÓPICO}$	: Valor del Número de Ponderación del Riesgo, calculado con el método macroscópico.
$N_{S_i h_i}^A$	: Grupo de severidad de criticidad.
$N_{S_i g_i}^L$	: Nivel de criticidad.
$N_{S_i p_i}^T$	: Grupo de severidad de criticidad.

- $n_D$  : Velocidad deseada en rev / min.
- $n_R$  : Velocidad nominal en rev / min.
- $P_{\left( D_{T_{S_i k_i}}^C \right)_{S_i k_i}}$  : 1 ó 0, según corresponda o no la variable de criticidad de un tipo de característica para un nivel y sistema dado  $S_{ij}$ .
- $P_{I_{S_i d_i e_i}}^C$  : 1 ó 0, según corresponda el nivel de impacto del aspecto operativo correspondiente al sistema  $S_{ij}$ .
- $P_{L_{S_i h_i}}^C$  : 1 ó 0, según corresponda la existencia o no del aspecto legal  $L^C_{S_i}$  para el sistema  $S_{ij}$ .
- $P_{P_{S_i e_i}}^C$  : 1 ó 0, según corresponda la existencia o no del aspecto legal  $P^C_{S_i}$  para el sistema  $S_{ij}$ .
- $P_{S_i c_i}^C$  : Puntos críticos de cada nivel y cada sistema susceptibles de aplicar RCM.
- $P_{\beta \chi \delta \epsilon \phi \gamma}$  : 0 ó 1 en función que aparezca la variable  $\phi$  en la ecuación  $\epsilon$ , para los tipos de gravedades.
- $P_{\beta \delta \epsilon \phi \gamma}$  : 0 ó 1 en función que aparezca la variable  $\phi$  en la ecuación  $\epsilon$  en la detectabilidad.
- $P_{\beta \eta \delta \epsilon \phi \gamma}$  : 0 ó 1 en función que aparezca la variable  $\phi$  en la ecuación  $\epsilon$ , para los tipos de frecuencias de fallos.
- $p_i$  : Número del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

- $R_I^{MP}$  : Número de personas en unidades.
- Q : Caudal de la bomba en m<sup>3</sup>/h.
- $q_i$  : Número de clasificación de modo de fallo de sistemas del nivel  $i$ .
- $R_{C_I^{IG}}^{I,aaac,ae}$  : Valor inferior del nivel de severidad de cantidad de incidencias.
- $R_{C_{IB}^{IG}}^{I,ah}$  : Valor inferior del nivel de severidad de cantidad de incidencias de bombas por tipo de incidencia.
- $R_{C_{IB}^{IG}}^{S,ah}$  : Valor superior del nivel de severidad de cantidad de incidencias de bombas por tipo de incidencia.
- $R_{C_I^{IG}}^{S,aaac,ae}$  : Valor superior del nivel de severidad de cantidad de incidencias.
- $R_{C_{IR}^{IG}}^{I,ah}$  : Valor inferior del nivel de severidad de cantidad de incidencias de reactores por tipo de incidencia.
- $R_{C_{IR}^{IG}}^{S,ah}$  : Valor superior del nivel de severidad de cantidad de incidencias de reactores por tipo de incidencia.
- $R_{C_T^{IG}}^{S,aaac,af}$  : Valor superior del nivel de severidad de coste.
- $R_{C_T^{IG}}^{I,aaac,af}$  : Valor inferior del nivel de severidad de coste.
- $R_{C_{TB}^{IG}}^{I,ak}$  : Valor inferior del nivel de severidad de coste de incidencias de bombas por tipo de incidencia.
- $R_{C_{TB}^{IG}}^{S,ak}$  : Valor superior del nivel de severidad de coste de incidencias de bombas por tipo de incidencia.

$\left( \begin{matrix} I \\ C_{TR}^{IG} \\ am \end{matrix} \right)$	: Valor inferior del nivel de severidad de coste de incidencias de reactores por tipo de incidencia.
$\left( \begin{matrix} S \\ C_{TR}^{IG} \\ am \end{matrix} \right)$	: Valor superior del nivel de severidad de coste de incidencias de reactores por tipo de incidencia.
$\left( \begin{matrix} I \\ M^{IG} \\ daac \quad dg \end{matrix} \right)$	: Valor inferior del nivel de severidad de medias coste/incidencia.
$\left( \begin{matrix} S \\ M^{IG} \\ daac \quad dg \end{matrix} \right)$	: Valor superior del nivel de severidad de medias coste/incidencia.
$\left( \begin{matrix} A \\ S_{ij} \\ \mathcal{A}_j^c \end{matrix} \right)$	: Criticidad de un sistema de un nivel concreto, para un método de valoración de variables de criticidad escogido.
$R_{S_{ij}}^L$	: Valor de criticidad de un sistema $S_{ij}$ , por el método de aspectos legales y puntos críticos.
$R_{S_{ij}}^T$	: Criticidad de un sistema de un nivel concreto, para todos los tipos de características.
Rend.	: Rendimiento de la bomba para cada regulación de caudal en %.
Rev.	: Revisión.
S	: Semana.
$S_i$	: Nombre del nivel del sistema $i$ susceptible de aplicar RCM; por ejemplo: tipo de industria, empresa, centro industrial, proceso, equipo, componente,...
$S_{ij}$	: Nombre del sistema $j$ de cada uno de los niveles $i$ .
$\left( \begin{matrix} MP \\ V \end{matrix} \right)$	: Coste de los servicios utilizados por intervención en €.

$T_f^C$	: Método de valoración de variables de criticidad.
$T_{S_i, k_i}^C$	: Tipos de características de cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
$T_{\alpha}^{NPR_{MACRO}}$	: Tipos de gravedad.
$\left( MP \right)$	: Tiempo de intervención en horas.
$u_{S_i, q_i}$	: Número de modo de fallo de cada clasificación de modo de fallo, por cada nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
V	: Cantidad de procesos con los cuales se realiza el estudio de comparación.
$\left( \begin{matrix} I_{S_i, e_i}^C \\ A_{S_i, d_i}^C \\ T_f^C \end{matrix} \right)$	: Valor de criticidad de un método de valoración de variables de criticidad, para un aspecto operativo y un nivel de impacto concreto y un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM dado.
$\left( \begin{matrix} C \\ C_T^{IG} \end{matrix} \right)_{abac}$	: Valor de coste.
$\left( \begin{matrix} C \\ C_{TR}^{IG} \end{matrix} \right)_{abac}$	: Valor de coste de incidencias en una bomba y tipo de incidencia.
$\left( \begin{matrix} C \\ C_{TB}^{IG} \end{matrix} \right)_{abac}$	: Valor de coste de incidencias en una bomba y tipo de incidencia.
$\left( \begin{matrix} I \\ C_{IB}^{IG} \end{matrix} \right)_{abac}$	: Valor de la cantidad de incidencias.
$\left( \begin{matrix} I \\ C_{IR}^{IG} \end{matrix} \right)_{abac}$	: Valor de la cantidad de incidencias.

$\left( V_{C_{S_i q_i}^{MF}}^F \right)_{u_{S_i q_i}}$  : Valor entre 1 y 10 de frecuencia de fallos de cada modo de fallo de clasificaciones de modos de fallos de niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

$\left( V_{C_{S_i q_i}^{MF}}^D \right)_{u_{S_i q_i}}$  : Valor entre 1 y 10 de detectabilidad de cada modo de fallo de clasificaciones de modos de fallos de niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

$V_{D_{T_{S_i k_i}}^C}$  : Valor de criticidad de cada variable, de tipos de variables de niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

$V_{L_{S_i p_i}^C}$  : Valor de criticidad de aspectos legales, para cada nivel  $S_i$  para todos los sistemas  $S_{ij}$ .

$V_{L_{S_{ij}}^M}$  : Valor de criticidad del aspecto legal  $L_{S_{ij}}^C$ .

$\left( M_{IG} \right)_{\alpha \alpha \alpha}$  : Valor de la media coste/incidencia.

$V_{N_{S_i h_i}^I}$  : Valor inferior del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

$V_{N_{S_i i}^I}$  : Valor inferior del nivel de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

$V_{N_{S_i h_i}^I}$  : Valor inferior del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

- 
- $V_{N_{S_i h_i}}^S$  : Valor superior del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $V_{N_{S_i g_i}}^S$  : Valor superior del nivel de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $V_{N_{S_i h_i}}^S$  : Valor superior del grupo de severidad de criticidad de un nivel de sistemas susceptibles de aplicar RCM.
- $V_{P_{S_i c_i}}^C$  : Valor de criticidad de puntos críticos, para cada nivel  $S_i$  para todos los sistemas  $S_{ij}$ .
- $V_{P_{S_{ij}}}^M$  : Valor de criticidad del punto crítico  $P_{S_{ij}}^C$ .
- $v$  : Número del proceso.
- $W$  : Cantidad de métodos de cálculo de la criticidad con los cuales hay que compararse.
- $w$  : Número del método de cálculo.
- $x_{vw}^{B2}$  : Posición ordenada del valor de criticidad de cada uno de los proceso y de cada uno de los métodos de cálculo, respecto al de referencia que es *Base2*.
- $x_{vw}^L$  : Posición ordenada del valor de criticidad de cada uno de los proceso y de cada uno de los métodos de cálculo, respecto al de referencia que es *Logarítmica*.
- $x_{vw}^P$  : Posición ordenada del valor de criticidad de cada uno de los proceso y de cada uno de los métodos de cálculo, respecto al de referencia que es *Número Primos*.

- $y_v^{B2}$  : Posición ordenada del valor de criticidad, del método de cálculo de referencia que es *Base2*.
- $y_v^L$  : Posición ordenada del valor de criticidad, del método de cálculo de referencia que es *Logarítmica*.
- $y_v^P$  : Posición ordenada del valor de criticidad, del método de cálculo de referencia que es *Número Primos*.

### **Griegas**

- $\alpha$  : Número de tipo de gravedad a los que afecta al modo de fallo de estudio.
- B : Modo de fallo de un equipo del estudio AMFEC.
- $\beta$  : Modo de fallo de un equipo del estudio AMFEC.
- X : Tipo de gravedad (nube tóxica, pérdida cliente, mantenimiento, gestión de stocks, etc.).
- $\chi$  : Tipo de gravedad (nube tóxica, pérdida cliente, mantenimiento, gestión de stocks, etc.).
- $\Delta$  : Fenómenos físico-químicos del equipo (transferencia de calor, mecánica de fluidos, fatiga de materiales, reacciones químicas).
- $\delta$  : Fenómenos físico-químicos del equipo (transferencia de calor, mecánica de fluidos, fatiga de materiales, reacciones químicas).
- E : Ecuaciones de los fenómenos físico-químicos.
- $\varepsilon$  : Ecuaciones de los fenómenos físico-químicos.

$\Phi$	: Variables de proceso (temperatura, presión, potencia, masa, ...).
$\phi$	: Variables de proceso (temperatura, presión, potencia, masa, ...).
$\Gamma$	: Cantidad de tipos de mantenimiento.
$\gamma$	: Punto de trabajo de variables de proceso respecto punto de diseño (...50%, 60%,..., 100%,..., 130%, 140%,...).
H	: Punto de trabajo de variables de proceso respecto punto de diseño (...50%, 60%,..., 100%,..., 130%, 140%,...).
$\eta$	: Tipo de frecuencia de fallos por tipos de equipos.
I	: Tipo de frecuencia de fallos por tipos de equipos.
$\varphi$	: Número de tipo de mantenimiento.
K	: Cantidad de especialidades.
$\kappa$	: Número de especialidad.
$\Lambda$	: Cantidad de intervenciones.
$\lambda$	: Número de intervención.
$\mu$	: Cantidad de tipos de gravedad que afecta al modo de fallo de estudio.
$\nu$	: Número de frecuencia de intervención.
O	: Cantidad de frecuencias de actuación (semanal, mensual, bimestral, trimestral, etc.).
$o$	: Número de frecuencia de actuación (semanal, mensual, bimestral, trimestral, etc.).

$\Theta$	: Cantidad de plantas.
$\theta$	: Número de plantas.
P	: Cantidad de equipos por planta.
$\rho$	: Número de equipo por planta.
$\Sigma$	: Cantidad de intervenciones de Mantenimiento Preventivo.
$\sigma$	: Número de intervención de Mantenimiento Preventivo.
T	: Cantidad de tipos de equipos.
$\tau$	: Número de tipo de equipo.
Y	: Cantidad de equipos por tipos de equipo.
$\upsilon$	: Número de equipo por tipos de equipo.
$\Omega$	: Cantidad de equipos por tipo de equipo y planta.
$\omega$	: Número de equipo por tipo de equipo y planta.

**Doble latinas**

AA	: Cantidad de tipo de equipos.
aa	: Número de tipo de equipo.
AB	: Cantidad de equipos de una planta industrial.
ab	: Número de equipo de una planta industrial.

<i>AC</i>	: Cantidad de tipos de incidencias.
<i>ac</i>	: Número de tipo de incidencia.
<i>AD</i>	: Cantidad de incidencias ocurridas en un equipo dado.
<i>ad</i>	: Número de incidencia ocurrida en un equipo dado.
<i>AE</i>	: Cantidad de niveles de severidad de la cantidad de incidencias.
<i>ae</i>	: Número del nivel de severidad de la cantidad de incidencias.
<i>AF</i>	: Cantidad de niveles de severidad de costes.
<i>af</i>	: Número del nivel de severidad de coste.
<i>AG</i>	: Cantidad de niveles de severidad de la cantidad de incidencias.
<i>ag</i>	: Número del nivel de severidad de la cantidad de incidencias.
<i>AH</i>	: Cantidad de niveles de severidad de la cantidad de incidencias de bombas.
<i>ah</i>	: Número del nivel de severidad de la cantidad de incidencias de bombas.
<i>AK</i>	: Cantidad de niveles de severidad de coste de incidencias de bombas.
<i>ak</i>	: Número del nivel de severidad de coste de incidencias de bombas.
<i>AL</i>	: Cantidad de niveles de severidad de la cantidad de incidencias de reactores.

*al* : Número del nivel de severidad de la cantidad de incidencias de reactores.

*AM* : Cantidad de niveles de severidad de coste de incidencias de reactores.

*am* : Número del nivel de severidad de coste de incidencias de reactores.

## ANEXO II: ECUACIONES

Serie 6.1: Niveles a los cuales se puede aplicar RCM.

$$\left\{ S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n \right\}$$

Serie 6.2: Sistemas de cada nivel.

$$\left\{ S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1j}, \dots, S_{1m} \right\}$$

$$\left\{ S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2j}, \dots, S_{2m} \right\}$$

...

$$\left\{ S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{ij}, \dots, S_{im} \right\}$$

...

$$\left\{ S_{n1}, S_{n2}, \dots, S_{nj}, \dots, S_{nm} \right\}$$

Ecuación 6.3: Cantidad de sistemas que se pueden seleccionar para aplicar la metodología RCM.

$$C_S = \prod_{i=1}^n C_{S_i} + \prod_{i=2}^n C_{S_i} + \dots + \prod_{i=n-1}^n C_{S_i} + C_{S_n}$$

Ecuación 6.4: Cantidad de sistemas susceptibles de aplicar la metodología RCM.

$$C_S^{G_i^E} = \sum_{a_i=1}^{C_i^{G_i^E}} C_{S_i}^{G_{ia_i}^E}$$

Ecuación 6.5: Cantidad total de sistemas susceptibles de aplicar la metodología RCM para todos los grupos y niveles.

$$C_S^{G^E} = \prod_{i=1}^n C_{S_i}^{G_i^E} + \prod_{i=2}^n C_{S_i}^{G_i^E} + \dots + \prod_{i=n-1}^n C_{S_i}^{G_i^E} + C_{S_n}^{G_n^E}$$

Serie 7.1: Aspectos legales por niveles de sistemas.

$$\left\{ L_{S_1,1}^C, L_{S_1,2}^C, \dots, L_{S_1,b_1}^C, \dots, L_{S_1,C_{L_{S_1}^c}}^C \right\}$$

$$\left\{ L_{S_2,1}^C, L_{S_2,2}^C, \dots, L_{S_2,b_2}^C, \dots, L_{S_2,C_{L_{S_2}^c}}^C \right\}$$

...

$$\left\{ L_{S_i,1}^C, L_{S_i,2}^C, \dots, L_{S_i,b_i}^C, \dots, L_{S_i,C_{L_{S_i}^c}}^C \right\}$$

...

$$\left\{ L_{S_n,1}^C, L_{S_n,2}^C, \dots, L_{S_n,b_n}^C, \dots, L_{S_n,C_{L_{S_n}^c}}^C \right\}$$

Serie 7.2: Puntos críticos por niveles de sistemas.

$$\left\{ P_{S_1,1}^C, P_{S_1,2}^C, \dots, P_{S_1,c_1}^C, \dots, P_{S_1,C_{P_{S_1}^c}}^C \right\}$$

$$\left\{ P_{S_2,1}^C, P_{S_2,2}^C, \dots, P_{S_2,c_2}^C, \dots, P_{S_2,C_{P_{S_2}^c}}^C \right\}$$

...

$$\left\{ P_{S_i,1}^C, P_{S_i,2}^C, \dots, P_{S_i,c_i}^C, \dots, P_{S_i,C_{P_{S_i}^c}}^C \right\}$$

...

$$\left\{ P_{S_n,1}^C, P_{S_n,2}^C, \dots, P_{S_n,c_n}^C, \dots, P_{S_n,C_{P_{S_n}^c}}^C \right\}$$

Ecuación 7.3: Cantidad de aspectos legales de todos los niveles de los sistemas.

$$C_{L^C} = \sum_{i=1}^n C_{L_{S_i}^C}$$

Ecuación 7.4: Cantidad de puntos críticos de todos los niveles de los sistemas.

$$C_{P^C} = \sum_{i=1}^n C_{P_{S_i}^C}$$

Ecuación 7.5: Cantidad de aspectos legales de todos los niveles de los sistemas, calculado para cada uno de los sistemas de cada uno de los niveles.

$$C_{L^C}^M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{L_{S_{ij}}^C}^M$$

Ecuación 7.6: Cantidad de puntos críticos de todos los niveles de los sistemas, calculado para cada uno de los sistemas de cada uno de los niveles.

$$C_{p^c}^M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{p_{S_{ij}}^c}^M$$

Ecuación 7.7: Valor de criticidad calculado con el método de aspectos legales y puntos críticos, para un sistema  $S_{ij}$  de un nivel  $S_i$ .

$$R_{S_{ij}}^L = \left( \sum_{b_i=1}^{C_{L_{S_i}}^c} V_{L_{S_{ij}b_i}}^c \cdot P_{L_{S_{ij}b_i}}^c + \sum_{c_i=1}^{C_{P_{S_i}}^c} V_{P_{S_{ij}c_i}}^c \cdot P_{P_{S_{ij}c_i}}^c \right)_{S_{ij}}$$

Serie 7.8: Niveles de criticidad para niveles de sistemas.

$$\left\{ N_{S_{11}}^L, N_{S_{12}}^L, \dots, N_{S_{1g_1}}^L, \dots, N_{S_{1C_{N_{S_1}}^L}}^L \right\}$$

$$\left\{ N_{S_{21}}^L, N_{S_{22}}^L, \dots, N_{S_{2g_2}}^L, \dots, N_{S_{2C_{N_{S_2}}^L}}^L \right\}$$

...

$$\left\{ N_{S_i1}^L, N_{S_i2}^L, \dots, N_{S_i g_i}^L, \dots, N_{S_i C_{N_{S_i}^L}}^L \right\}$$

...

$$\left\{ N_{S_n1}^L, N_{S_n2}^L, \dots, N_{S_n g_n}^L, \dots, N_{S_n C_{N_{S_n}^L}}^L \right\}$$

Sistema de ecuaciones 7.9: Rangos de valores de criticidad.

$$\left\{ V_{N_{S_1}^L}^I = 0; V_{N_{S_2}^L}^I = V_{N_{S_1}^L}^S + 1; V_{N_{S_3}^L}^I = V_{N_{S_2}^L}^S + 1; \dots; V_{N_{S_i C_{N_{S_i}^L}}^L}^I = V_{N_{S_i C_{N_{S_i}^L}^{-1}}^S} + 1 \right\}$$

Serie 7.10: Aspectos operativos.

$$\left\{ A_{S_1,1}^C, A_{S_1,2}^C, \dots, A_{S_1,d_1}^C, \dots, A_{S_1,C_{A_{S_1}^C}}^C \right\}$$

$$\left\{ A_{S_2,1}^C, A_{S_2,2}^C, \dots, A_{S_2,d_2}^C, \dots, A_{S_2,C_{A_{S_2}^C}}^C \right\}$$

...

$$\left\{ A_{S_i,1}^C, A_{S_i,2}^C, \dots, A_{S_i,d_i}^C, \dots, A_{S_i,C_{A_{S_i}^C}}^C \right\}$$

...

$$\left\{ A_{S_n,1}^C, A_{S_n,2}^C, \dots, A_{S_n,d_n}^C, \dots, A_{S_n,C_{A_{S_n}^C}}^C \right\}$$

Serie 7.11: Niveles de impacto.

$$\left\{ I_{S_1,1}^C, I_{S_1,2}^C, \dots, I_{S_1,e_1}^C, \dots, I_{S_1,C_{I_{S_1}^C}}^C \right\}$$

$$\left\{ I_{S_2,1}^C, I_{S_2,2}^C, \dots, I_{S_2,e_2}^C, \dots, I_{S_2,C_{I_{S_2}^C}}^C \right\}$$

...

$$\left\{ I_{S_i,1}^C, I_{S_i,2}^C, \dots, I_{S_i,e_i}^C, \dots, I_{S_i,C_{I_{S_i}^C}}^C \right\}$$

...

$$\left\{ I_{S_n,1}^C, I_{S_n,2}^C, \dots, I_{S_n,e_n}^C, \dots, I_{S_n,C_{I_{S_n}^C}}^C \right\}$$

Ecuación 7.12: Cantidad de aspectos operativos.

$$C_{A^C} = \sum_{i=1}^n C_{A_{S_i}^C}$$

Ecuación 7.13: Cantidad de niveles de impacto.

$$C_{I^c} = \sum_{i=1}^n C_{I_{S_i}^c}$$

Serie 7.14: Métodos de valoración de variables de criticidad.

$$T_1^c, T_2^c, \dots, T_f^c, \dots, T_F^c$$

Ecuación 7.15: Valor de criticidad de un sistema de un nivel concreto.

$$R_{S_{ij}}^A = \sum_{d_i=1}^{C_{S_i}^c} \sum_{e_i=1}^{C_{I_{S_i}^c}} \left( V_{S_i d_i}^c \right) \cdot P_{I_{S_i d_i e_i}^c}$$

Serie 7.16: Niveles de criticidad para niveles de sistemas.

$$\left\{ N_{S_1 1}^A, N_{S_1 2}^A, \dots, N_{S_1 h_1}^A, \dots, N_{S_1 C_{N_{S_1}^A}}^A \right\}$$

$$\left\{ N_{S_2 1}^A, N_{S_2 2}^A, \dots, N_{S_2 h_2}^A, \dots, N_{S_2 C_{N_{S_2}^A}}^A \right\}$$

...

$$\left\{ N_{S_i 1}^A, N_{S_i 2}^A, \dots, N_{S_i h_i}^A, \dots, N_{S_i C_{N_{S_i}^A}}^A \right\}$$

...

$$\left\{ N_{S_n 1}^A, N_{S_n 2}^A, \dots, N_{S_n h_n}^A, \dots, N_{S_n C_{N_{S_n}^A}}^A \right\}$$

Sistema de ecuaciones 7.17: Valores de rangos de criticidad.

$$\left\{ V_{N_{S_i 1}^A}^I = 0; V_{N_{S_i 2}^A}^I = V_{N_{S_i 1}^A}^S + 1; V_{N_{S_i 3}^A}^I = V_{N_{S_i 2}^A}^S + 1; \dots; V_{N_{S_i C_{N_{S_i}^A}}^A}^I = V_{N_{S_i C_{N_{S_i}^A} - 1}^A}^S + 1 \right\}$$

Ecuación 7.18: Comparación de métodos de criticidad respecto *Logarítmica*.

$$C_{LOGARÍTMICA}^C = \sum_{w=1}^W \sum_{v=1}^V |y_v^L - x_{vw}^L|$$

Ecuación 7.19: Comparación de métodos de criticidad respecto *Números Primos*.

$$C_{PRIMOS}^C = \sum_{w=1}^W \sum_{v=1}^V |y_v^P - x_{vw}^P|$$

Ecuación 7.20: Comparación de métodos de criticidad respecto *Base2*.

$$C_{BASE2}^C = \sum_{w=1}^W \sum_{v=1}^V |y_v^{B2} - x_{vw}^{B2}|$$

Serie 7.21: Tipos de características de cada nivel de sistemas.

$$\left\{ T_{S_1 1}^C, T_{S_1 2}^C, \dots, T_{S_1 k_1}^C, \dots, T_{S_1 C_{T_{S_1}^C}}^C \right\}$$

$$\left\{ T_{S_2 1}^C, T_{S_2 2}^C, \dots, T_{S_2 k_2}^C, \dots, T_{S_2 C_{T_{S_2}^C}}^C \right\}$$

...

$$\left\{ T_{S_i 1}^C, T_{S_i 2}^C, \dots, T_{S_i k_i}^C, \dots, T_{S_i C_{T_{S_i}^C}}^C \right\}$$

...

$$\left\{ T_{S_n 1}^C, T_{S_n 2}^C, \dots, T_{S_n k_n}^C, \dots, T_{S_n C_{T_{S_n}^C}}^C \right\}$$

Serie 7.22: Variables englobadas en cada una de los tipos de características.

$$\left\{ \left( \mathbf{b}_{T_{S_1}^c} \right)_{T_{S_1}^c}, \left( \mathbf{b}_{T_{S_1}^c} \right)_{T_{S_1}^c}, \dots, \left( \mathbf{b}_{T_{S_1}^c} \right)_{T_{S_1}^c}, \dots, \left( D_{T_{S_1}^c} \right)_{C_{S_1} C_{T_{S_1}^c}} \right\}$$

$$\left\{ \left( \mathbf{b}_{T_{S_2}^c} \right)_{T_{S_2}^c}, \left( \mathbf{b}_{T_{S_2}^c} \right)_{T_{S_2}^c}, \dots, \left( \mathbf{b}_{T_{S_2}^c} \right)_{T_{S_2}^c}, \dots, \left( D_{T_{S_2}^c} \right)_{C_{S_2} C_{T_{S_2}^c}} \right\}$$

...

$$\left\{ \left( \mathbf{b}_{T_{S_i}^c} \right)_{T_{S_i}^c}, \left( \mathbf{b}_{T_{S_i}^c} \right)_{T_{S_i}^c}, \dots, \left( \mathbf{b}_{T_{S_i}^c} \right)_{T_{S_i}^c}, \dots, \left( D_{T_{S_i}^c} \right)_{C_{S_i} C_{T_{S_i}^c}} \right\}$$

...

$$\left\{ \left( \mathbf{b}_{T_{S_n}^c} \right)_{T_{S_n}^c}, \left( \mathbf{b}_{T_{S_n}^c} \right)_{T_{S_n}^c}, \dots, \left( \mathbf{b}_{T_{S_n}^c} \right)_{T_{S_n}^c}, \dots, \left( D_{T_{S_n}^c} \right)_{C_{S_n} C_{T_{S_n}^c}} \right\}$$

Ecuación 7.23: Cantidad de tipos de características de criticidad por cada tipo de característica de todos los niveles de los sistemas, para todos los sistemas.

$$C_{T^c} = \sum_{i=1}^n C_{T_{S_i}^c}$$

Ecuación 7.24: Cantidad de tipos de variables de criticidad por cada tipo de característica de todos los niveles de los sistemas, para todos los sistemas.

$$C_{SC_{T^c}} = \sum_{i=1}^n \sum_{k_i=1}^{C_{T_{S_i}^c}} \left( C_{S_i C_{T_{S_i}^c}} \right)_{k_i}$$

Serie 7.25: Rango inferiores de cantidad de variables por tipos de características.

$$\left\{ \begin{matrix} \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_1^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_1^1}}, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_1^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_1^2}}, \dots, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_1^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_1^{k_1}}}, \dots, \left( \begin{matrix} E^I \\ T_{S_1^c}^c T_{S_1^c}^c \end{matrix} \right)_{C_{S_1^c} M_{S_1^c}} \end{matrix} \right\}$$

$$\left\{ \begin{matrix} \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_2^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_2^1}}, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_2^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_2^2}}, \dots, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_2^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_2^{k_2}}}, \dots, \left( \begin{matrix} E^I \\ T_{S_2^c}^c T_{S_2^c}^c \end{matrix} \right)_{C_{S_2^c} M_{S_2^c}} \end{matrix} \right\}$$

...

$$\left\{ \begin{matrix} \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_i^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_i^1}}, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_i^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_i^2}}, \dots, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_i^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_i^{k_i}}}, \dots, \left( \begin{matrix} E^I \\ T_{S_i^c}^c T_{S_i^c}^c \end{matrix} \right)_{C_{S_i^c} M_{S_i^c}} \end{matrix} \right\}$$

...

$$\left\{ \begin{matrix} \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_n^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_n^1}}, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_n^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_n^2}}, \dots, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^I \\ T_{S_n^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_n^{k_n}}}, \dots, \left( \begin{matrix} E^I \\ T_{S_n^c}^c T_{S_n^c}^c \end{matrix} \right)_{C_{S_n^c} M_{S_n^c}} \end{matrix} \right\}$$

Serie 7.26: Rangos superiores de cantidad de variables por tipos de características.

$$\left\{ \begin{matrix} \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_1^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_1^1}}, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_1^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_1^2}}, \dots, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_1^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_1^{k_1}}}, \dots, \left( \begin{matrix} E^S \\ T_{S_1^c}^c T_{S_1^c}^c \end{matrix} \right)_{C_{S_1^c} M_{S_1^c}} \end{matrix} \right\}$$

$$\left\{ \begin{matrix} \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_2^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_2^1}}, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_2^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_2^2}}, \dots, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_2^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_2^{k_2}}}, \dots, \left( \begin{matrix} E^S \\ T_{S_2^c}^c T_{S_2^c}^c \end{matrix} \right)_{C_{S_2^c} M_{S_2^c}} \end{matrix} \right\}$$

...

$$\left\{ \begin{matrix} \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_i^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_i^1}}, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_i^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_i^2}}, \dots, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_i^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_i^{k_i}}}, \dots, \left( \begin{matrix} E^S \\ T_{S_i^c}^c T_{S_i^c}^c \end{matrix} \right)_{C_{S_i^c} M_{S_i^c}} \end{matrix} \right\}$$

...

$$\left\{ \begin{matrix} \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_n^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_n^1}}, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_n^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_n^2}}, \dots, \left( \begin{matrix} \mathbb{E}^S \\ T_{S_n^c}^c \end{matrix} \right)_{m_{S_n^{k_n}}}, \dots, \left( \begin{matrix} E^S \\ T_{S_n^c}^c T_{S_n^c}^c \end{matrix} \right)_{C_{S_n^c} M_{S_n^c}} \end{matrix} \right\}$$

Ecuación 7.27: Cantidad de rangos de criticidad de variables de criticidad, por cada tipo de característica de todos los niveles de los sistemas, para todos los sistemas.

$$F_C^R = \sum_{i=1}^n \sum_{k_i=1}^{C_{T_{S_i}}^c} \left( C_{S_i C_{M_{S_i}}^c} \right)_{k_i}$$

Ecuación 7.28: Valor de criticidad de un sistema de un nivel concreto.

$$R_{S_{ij}}^T = \sum_{k_i=1}^{C_{T_{S_i}}^c} \sum_{l_{S_{ik_i}}=1}^{C_{S_i C_{T_{S_i}}^c}} V_{\left( D_{T_{S_{ik_i}}}^c \right)_{l_{S_{ik_i}}}} \cdot P_{\left( D_{T_{S_{ik_i}}}^c \right)_{l_{S_{ik_i}}}}$$

Serie 7.29: Niveles de criticidad para niveles de sistemas.

$$\left\{ N_{S_1 1}^T, N_{S_1 2}^T, \dots, N_{S_1 p_1}^T, \dots, N_{S_1 C_{N_{S_1}}^T} \right\}$$

$$\left\{ N_{S_2 1}^T, N_{S_2 2}^T, \dots, N_{S_2 p_2}^T, \dots, N_{S_2 C_{N_{S_2}}^T} \right\}$$

...

$$\left\{ N_{S_i 1}^T, N_{S_i 2}^T, \dots, N_{S_i p_i}^T, \dots, N_{S_i C_{N_{S_i}}^T} \right\}$$

...

$$\left\{ N_{S_n 1}^T, N_{S_n 2}^T, \dots, N_{S_n p_n}^T, \dots, N_{S_n C_{N_{S_n}}^T} \right\}$$

Sistema de ecuaciones 7.30: Rangos de grupos de severidad de criticidad.

$$\left\{ V_{N_{S_1 1}^T}^I = 0; V_{N_{S_1 2}^T}^I = V_{N_{S_1 1}^T}^S + 1; V_{N_{S_1 3}^T}^I = V_{N_{S_1 2}^T}^S + 1; \dots; V_{N_{S_i C_{N_{S_i}}^T}^T}^I = V_{N_{S_i C_{N_{S_i}}^T - 1}^T}^S + 1 \right\}$$

Serie 8.1: Clasificaciones de modos de fallos.

$$\left\{ C_{S_1 1}^{MF}, C_{S_1 2}^{MF}, \dots, C_{S_1 q_1}^{MF}, \dots, C_{S_1 C_{S_1}^{MF}}^{MF} \right\}$$

$$\left\{ C_{S_2 1}^{MF}, C_{S_2 2}^{MF}, \dots, C_{S_2 q_2}^{MF}, \dots, C_{S_2 C_{S_2}^{MF}}^{MF} \right\}$$

...

$$\left\{ C_{S_i 1}^{MF}, C_{S_i 2}^{MF}, \dots, C_{S_i q_i}^{MF}, \dots, C_{S_i C_{S_i}^{MF}}^{MF} \right\}$$

...

$$\left\{ C_{S_n 1}^{MF}, C_{S_n 2}^{MF}, \dots, C_{S_n q_n}^{MF}, \dots, C_{S_n C_{S_n}^{MF}}^{MF} \right\}$$

Ecuación 8.2: Clasificaciones de modos de fallos de todos los niveles de los sistemas, para todos los sistemas.

$$C_{C^{MF}} = \sum_{i=1}^n C_{C_{S_i}^{MF}}$$

Serie 8.3: Modos de fallos de las clasificaciones para todos los niveles de sistemas susceptibles de aplicar RCM.

$$\left\{ \left( F_{C_{S_1 1}^{MF}} \right)_{u_{S_1 1}}, \left( F_{C_{S_1 2}^{MF}} \right)_{u_{S_1 2}}, \dots, \left( F_{C_{S_1 q_1}^{MF}} \right)_{u_{S_1 q_1}}, \dots, \left( F_{C_{S_1 C_{S_1}^{MF}}^{MF}} \right)_{C_{S_1}^{MF} C_{C_{S_1}^{MF}}^{MF}} \right\}$$

$$\left\{ \left( F_{C_{S_2 1}^{MF}} \right)_{u_{S_2 1}}, \left( F_{C_{S_2 2}^{MF}} \right)_{u_{S_2 2}}, \dots, \left( F_{C_{S_2 q_2}^{MF}} \right)_{u_{S_2 q_2}}, \dots, \left( F_{C_{S_2 C_{S_2}^{MF}}^{MF}} \right)_{C_{S_2}^{MF} C_{C_{S_2}^{MF}}^{MF}} \right\}$$

...

$$\left\{ \left( F_{C_{S_i 1}^{MF}} \right)_{u_{S_i 1}}, \left( F_{C_{S_i 2}^{MF}} \right)_{u_{S_i 2}}, \dots, \left( F_{C_{S_i q_i}^{MF}} \right)_{u_{S_i q_i}}, \dots, \left( F_{C_{S_i C_{S_i}^{MF}}^{MF}} \right)_{C_{S_i}^{MF} C_{C_{S_i}^{MF}}^{MF}} \right\}$$

...

$$\left\{ \left( F_{C_{S_n 1}^{MF}} \right)_{u_{S_n 1}}, \left( F_{C_{S_n 2}^{MF}} \right)_{u_{S_n 2}}, \dots, \left( F_{C_{S_n q_n}^{MF}} \right)_{u_{S_n q_n}}, \dots, \left( F_{C_{S_n C_{S_n}^{MF}}^{MF}} \right)_{C_{S_n}^{MF} C_{C_{S_n}^{MF}}^{MF}} \right\}$$

Serie 8.4: Valoración de la frecuencia de fallos.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \gamma_{C_{S_1}^{MF}}^F \right)_{u_{S_1 1}}, \left( \gamma_{C_{S_1 2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_1 2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_1 q_1}^{MF}}^F \right)_{u_{S_1 q_1}}, \dots, \left( V_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}}^F \right)_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}} \\ \left( \gamma_{C_{S_2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_2 1}}, \left( \gamma_{C_{S_2 2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_2 2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_2 q_2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_2 q_2}}, \dots, \left( V_{C_{S_2}^{MF} C_{S_2}^{MF}}^F \right)_{C_{S_2}^{MF} C_{S_2}^{MF}} \\ \dots \\ \left( \gamma_{C_{S_i}^{MF}}^F \right)_{u_{S_i 1}}, \left( \gamma_{C_{S_i 2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_i 2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_i q_i}^{MF}}^F \right)_{u_{S_i q_i}}, \dots, \left( V_{C_{S_i}^{MF} C_{S_i}^{MF}}^F \right)_{C_{S_i}^{MF} C_{S_i}^{MF}} \\ \dots \\ \left( \gamma_{C_{S_n}^{MF}}^F \right)_{u_{S_n 1}}, \left( \gamma_{C_{S_n 2}^{MF}}^F \right)_{u_{S_n 2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_n q_n}^{MF}}^F \right)_{u_{S_n q_n}}, \dots, \left( V_{C_{S_n}^{MF} C_{S_n}^{MF}}^F \right)_{C_{S_n}^{MF} C_{S_n}^{MF}} \end{array} \right\}$$

Serie 8.5: valoración de detectabilidad.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \gamma_{C_{S_1}^{MF}}^D \right)_{u_{S_1 1}}, \left( \gamma_{C_{S_1 2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_1 2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_1 q_1}^{MF}}^D \right)_{u_{S_1 q_1}}, \dots, \left( V_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}}^D \right)_{C_{S_1}^{MF} C_{S_1}^{MF}} \\ \left( \gamma_{C_{S_2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_2 1}}, \left( \gamma_{C_{S_2 2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_2 2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_2 q_2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_2 q_2}}, \dots, \left( V_{C_{S_2}^{MF} C_{S_2}^{MF}}^D \right)_{C_{S_2}^{MF} C_{S_2}^{MF}} \\ \dots \\ \left( \gamma_{C_{S_i}^{MF}}^D \right)_{u_{S_i 1}}, \left( \gamma_{C_{S_i 2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_i 2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_i q_i}^{MF}}^D \right)_{u_{S_i q_i}}, \dots, \left( V_{C_{S_i}^{MF} C_{S_i}^{MF}}^D \right)_{C_{S_i}^{MF} C_{S_i}^{MF}} \\ \dots \\ \left( \gamma_{C_{S_n}^{MF}}^D \right)_{u_{S_n 1}}, \left( \gamma_{C_{S_n 2}^{MF}}^D \right)_{u_{S_n 2}}, \dots, \left( \gamma_{C_{S_n q_n}^{MF}}^D \right)_{u_{S_n q_n}}, \dots, \left( V_{C_{S_n}^{MF} C_{S_n}^{MF}}^D \right)_{C_{S_n}^{MF} C_{S_n}^{MF}} \end{array} \right\}$$

Ecuación 8.6: Valor del NPR para un modo de fallo determinado.

$$NPR \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}} = G \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}} \cdot F \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}} \cdot D \left( F_{C_{S_i q_i}}^{MF} \right)_{u_{S_i q_i}}$$

Serie 8.7: Tipos de gravedad.

$$\left\{ T_1^{NPR_{MACRO}}, T_2^{NPR_{MACRO}}, \dots, T_\alpha^{NPR_{MACRO}}, \dots, T_\mu^{NPR_{MACRO}} \right\}$$

Ecuación 8.8: Valor del NPR macroscópico.

$$NPR_{MACROSCÓPICO} = \frac{1}{\mu} \cdot \sum_{\alpha=1}^{\mu} G_\alpha^{NPR_{MACRO}} \cdot F^{NPR_{MACRO}} \cdot D^{NPR_{MACRO}}$$

Ecuación 8.9: Dependencia del NPR microscópico de un modo de fallo en concreto.

$$NPR_{MICROSCÓPICO} = f \left[ \begin{array}{ccccccccc} G_\beta^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi\delta}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi\delta\epsilon}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi\delta\epsilon\phi}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & G_{\beta\chi\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & \dots & \dots \\ F_\beta^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta\delta}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta\delta\epsilon}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta\delta\epsilon\phi}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & F_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & \dots & \dots \\ D_\beta^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta\epsilon}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta\epsilon\phi}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & D_{\beta\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} & \dots & \dots \end{array} \right]$$

Ecuación 8.10: Gravedad.

$$G_\beta^{NPR_{MICRO}} = \frac{\sum_{\chi} \sum_{\delta} \sum_{\epsilon} \sum_{\phi} \sum_{\gamma} g_{\beta\chi\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} \cdot P_{\beta\chi\delta\epsilon\phi\gamma}}{\sum_{\chi} \sum_{\delta} \sum_{\epsilon} \sum_{\phi} \sum_{\gamma} P_{\beta\chi\delta\epsilon\phi\gamma}}$$

Ecuación 8.11: Frecuencia de fallos.

$$F_\beta^{NPR_{MICRO}} = \frac{\sum_{\eta} \sum_{\delta} \sum_{\epsilon} \sum_{\phi} \sum_{\gamma} f_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} \cdot P_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}}{\sum_{\eta} \sum_{\delta} \sum_{\epsilon} \sum_{\phi} \sum_{\gamma} P_{\beta\eta\delta\epsilon\phi\gamma}}$$

Ecuación 8.12: Detectabilidad.

$$D_{\beta}^{NPR_{MICRO}} = \frac{\sum_{\delta}^{\Lambda} \sum_{\varepsilon}^E \sum_{\phi}^{\Phi} \sum_{\gamma}^H d_{\beta\delta\varepsilon\phi\gamma}^{NPR_{MICRO}} \cdot P_{\beta\delta\varepsilon\phi\gamma}}{\sum_{\delta}^{\Lambda} \sum_{\varepsilon}^E \sum_{\phi}^{\Phi} \sum_{\gamma}^H P_{\beta\delta\varepsilon\phi\gamma}}$$

Ecuación 8.13: Valor del número de ponderación de riesgo microscópico.

$$NPR_{MICROSCÓPICO} = G_{\beta}^{NPR_{MICRO}} \cdot F_{\beta}^{NPR_{MICRO}} \cdot D_{\beta}^{NPR_{MICRO}}$$

Ecuación 8.14: Carga clasificada del rodamiento en kN.

$$C_{10} \left( C_R n_R 60 \right)^{Tn^a} = F_D \left( C_D n_D 60 \right)^{Tn^a}$$

Serie 9.1: Tipos de mantenimiento del plan estratégico de mantenimiento.

$$\left\{ M_1^E, M_2^E, \dots, M_{\phi}^E, \dots, M_{\Gamma}^E \right\}$$

Serie 9.2: Especialidades del plan estratégico de mantenimiento.

$$\left\{ E_1^E, E_2^E, \dots, E_{\kappa}^E, \dots, E_{\kappa}^E \right\}$$

Serie 9.3: Intervenciones del plan estratégico de mantenimiento.

$$\left\{ I_1^E, I_2^E, \dots, I_{\lambda}^E, \dots, I_{\Lambda}^E \right\}$$

Serie 9.4: Frecuencias de intervención para el plan estratégico de mantenimiento.

$$\left\{ F_1^E, F_2^E, \dots, F_{\nu}^E, \dots, F_N^E \right\}$$

Ecuación 9.5: Coste de mantenimiento preventivo por plantas.

$$C_{TP}^{MP} = \sum_{\theta=1}^{\Theta} \sum_{o=1}^O \left( C_{P_{\theta}}^{MP} \right) \cdot F_o^A$$

Ecuación 9.6: Coste de la Ruta de Mantenimiento Preventivo de una frecuencia y planta dada.

$$C_{P_{\theta}}^{MP} = \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( C_{I_{\sigma}}^{MP} \cdot \sum_{\rho=1}^P E_{\rho\sigma}^{MP} \right)$$

Ecuación 9.7: Coste total por plantas.

$$C_{TP}^{MP} = \sum_{\theta=1}^{\Theta} \sum_{o=1}^O \left( \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( C_{I_{\sigma}}^{MP} \cdot \sum_{\rho=1}^P E_{\rho\sigma}^{MP} \right) \right) \cdot F_o^A$$

Ecuación 9.8: Coste anual de Mantenimiento Preventivo por tipos de equipos.

$$C_{TE}^{MP} = \sum_{\tau=1}^T \sum_{o=1}^O \left( C_{E_{\tau}}^{MP} \right) \cdot F_o^A$$

Ecuación 9.9: Coste de la ruta de Mantenimiento Preventivo de una frecuencia y tipo de equipo dado.

$$C_{E_{\tau}}^{MP} = \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( C_{I_{\sigma}}^{MP} \cdot \sum_{\nu=1}^Y E_{\sigma\nu}^{MP} \right)$$

Ecuación 9.10: Coste total por plantas.

$$C_{TE}^{MP} = \sum_{\tau=1}^T \sum_{o=1}^O \left( \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( C_{I_{\sigma}}^{MP} \cdot \sum_{\nu=1}^Y E_{\sigma\nu}^{MP} \right) \right) \cdot F_o^A$$

Ecuación 9.11: Coste total anual por plantas y tipos de equipos.

$$C_{TPE}^{MP} = \sum_{\tau=1}^T \sum_{\theta=1}^{\Theta} \sum_{\omega=1}^{\Omega} C_{PE}^{MP} \cdot F_o^A$$

Ecuación 9.12: Coste por planta y tipo de equipo.

$$C_{PE}^{MP} = \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( C_I^{MP} \cdot \sum_{\omega=1}^{\Omega} E_{\sigma\omega}^{MP} \right)$$

Ecuación 9.13: Costes de Mantenimiento Preventivo por plantas y tipos de equipos.

$$C_{TPE}^{MP} = \sum_{\tau=1}^T \sum_{\theta=1}^{\Theta} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \left( \sum_{\sigma=1}^{\Sigma} \left( C_I^{MP} \cdot \sum_{\omega=1}^{\Omega} E_{\sigma\omega}^{MP} \right) \right) \cdot F_o^A$$

Ecuación 9.14: Coste de intervención de Mantenimiento Preventivo por equipo.

$$C_I^{MP} = C_I^{MP} \cdot C_I^{MP} \cdot C_I^{MP} + C_I^{MP} + C_I^{MP} + C_I^{MP}$$

Ecuación 10.1: Cantidad de incidencias ocurridas en una planta industrial.

$$C_I^{IG} = \sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} I_I^{IG}$$

Serie 10.2: Niveles de severidad de la cantidad de incidencias.

$$\left\{ N_1^{IG_I}, N_2^{IG_I}, \dots, N_{ae}^{IG_I}, \dots, N_{AE}^{IG_I} \right\}$$

Ecuación 10.3: Valor de la cantidad de incidencias.

$$C_I^{IG} = \left( \sum_{ab}^{AB} \sum_{ad}^{AD} I_I^{IG} \right)_{aaac}$$

Ecuación 10.4: Coste de mantenimiento de todas las incidencias ocurridas en un centro industrial.

$$C_T^{IG} = \sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} C_{aaabacad}^{IG}$$

Serie 10.5: Niveles de severidad de la cantidad de incidencias.

$$\left\{ N_1^{IG_c}, N_2^{IG_c}, \dots, N_{af}^{IG_c}, \dots, N_{AF}^{IG_c} \right\}$$

Ecuación 10.6: Valor del coste de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de coste de incidencias.

$$\left( C_T^{IG} \right)_{aaac} = \left( \sum_{ab}^{AB} \sum_{ad}^{AD} C_{abad}^{IG} \right)_{aaac}$$

Ecuación 10.7: Ratio entre el coste de mantenimiento y todas las incidencias.

$$M_{C_T^{IG} / C_I^{IG}} = \frac{C_T^{IG}}{C_I^{IG}} = \frac{\sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} C_{aaabacad}^{IG}}{\sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} I_{aaabacad}^{IG}}$$

Ecuación 10.8: Coste medio por tipo de equipo.

$$\left( \overline{C_E^{IG}} \right)_{aa} = \frac{\sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} C_{abacad}^{IG}}{\sum_{ab}^{AB} \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} I_{abacad}^{IG}}$$

Ecuación 10.9: Coste medio por tipo de incidencia.

$$\left( \overline{C_I^{IG}} \right)_{aa} = \frac{\sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ad}^{AD} C_{aaabad}^{IG}}{\sum_{aa}^{AA} \sum_{ab}^{AB} \sum_{ad}^{AD} I_{aaabad}^{IG}}$$

Serie 10.10: Niveles de severidad de medias coste/incidencia.

$$\left\{ N_1^{IG_M}, N_2^{IG_M}, \dots, N_{ag}^{IG_M}, \dots, N_{AG}^{IG_M} \right\}$$

Ecuación 10.11: Valor de la cantidad de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de medias coste/incidencias.

$$C_{M \text{ acad}}^{IG} = \left( \frac{\sum_{ab}^{AB} \sum_{ad}^{AD} C_{abad}^{IG}}{\sum_{ab}^{AB} \sum_{ad}^{AD} I_{abad}^{IG}} \right)_{aaac}$$

Ecuación 10.12: Cantidad de incidencias ocurridas en una bomba para todos los tipos de incidencias.

$$C_{IB \text{ ab}}^{IG} = \left( \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} I_{IB \text{ acad}}^{IG} \right)_{ab}$$

Serie 10.13: Niveles de severidad de la cantidad de incidencias de bombas.

$$\left\{ N_1^{IG_{IB}}, N_2^{IG_{IB}}, \dots, N_{ah}^{IG_{IB}}, \dots, N_{AH}^{IG_{IB}} \right\}$$

Ecuación 10.14: Valor de la cantidad de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de cantidad de incidencias de bombas por tipo de incidencia.

$$C_{IB \text{ abac}}^{IG} = \left( \sum_{ad}^{AD} I_{IB \text{ ad}}^{IG} \right)_{abac}$$

Ecuación 10.15: Coste de incidencias ocurridas en una bomba para todos los tipos de incidencias.

$$C_{TB \text{ ab}}^{IG} = \left( \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} C_{B \text{ acad}}^{IG} \right)_{ab}$$

Serie 10.16: Niveles de severidad de la cantidad de incidencias de bombas.

$$\left\{ N_1^{IG_{CB}}, N_2^{IG_{CB}}, \dots, N_{ak}^{IG_{CB}}, \dots, N_{AK}^{IG_{CB}} \right\}$$

Ecuación 10.17: Valor de coste de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de coste de incidencias de bombas por tipo de incidencia.

$$\left( C_{TB}^{IG} \right)_{abac} = \left( \sum_{ad}^{AD} C_{B ad}^{IG} \right)_{abac}$$

Ecuación 10.18: Cantidad de incidencias ocurridas en un reactor para todos los tipos de incidencias.

$$\left( I_{IR}^{IG} \right)_{ab} = \left( \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} I_{IR acad}^{IG} \right)_{ab}$$

Ecuación 10.19: Niveles de severidad de la cantidad de incidencias de reactores.

$$\left\{ N_1^{IG_{IR}}, N_2^{IG_{IR}}, \dots, N_{al}^{IG_{IR}}, \dots, N_{AL}^{IG_{IR}} \right\}$$

Ecuación 10.20: Valor de la cantidad de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de cantidad de incidencias de reactores por tipo de incidencia.

$$\left( C_{IR}^{IG} \right)_{abac} = \left( \sum_{ad}^{AD} I_{IR ad}^{IG} \right)_{abac}$$

Ecuación 10.21: Coste de incidencias ocurridas en un reactor para todos los tipos de incidencias.

$$C_{TR}^{IG} = \left( \sum_{ac}^{AC} \sum_{ad}^{AD} C_{R\ acad}^{IG} \right)_{ab}$$

Serie 10.22: Nivel de severidad de la cantidad de incidencias de reactores.

$$\left\{ N_1^{IG_{CR}}, N_2^{IG_{CR}}, \dots, N_{am}^{IG_{CR}}, \dots, N_{AM}^{IG_{CR}} \right\}$$

Ecuación 10.23: Valor de coste de incidencias, por el cual se cataloga su nivel de severidad de coste de incidencias de reactores por tipo de incidencia.

$$C_{TR}^{IG} = \left( \sum_{ad}^{AD} C_{R\ ad}^{IG} \right)_{abac}$$

## ANEXO III: TABLAS, GRÁFICAS Y FIGURAS

### Tablas

Tabla 4.1	Ejemplos de parámetros.
Tabla 4.2	Familias de Fallos Funcionales frecuentes.
Tabla 4.3	Modos de Fallos de un motor con variador de velocidad.
Tabla 6.1	Niveles de sistemas y ejemplos.
Tabla 6.2	Ejemplos de grupos de sistemas por niveles.
Tabla 6.3	Sistemas del nivel tipos de equipo.
Tabla 6.4	Equipos de Máquinas Rotativas.
Tabla 6.5	Equipos de intercambio de Calor.
Tabla 6.6	Equipos de Depósitos.

Tabla 6.7	Equipos de Valvulería.
Tabla 7.1	Aspectos legales para el cálculo de la criticidad.
Tabla 7.2	Puntos críticos para el cálculo de la criticidad.
Tabla 7.3	Caso de estudio valores de criticidad para una empresa del sector químico.
Tabla 7.4	Valores de criticidad del método de cálculo Logarítmica.
Tabla 7.5	Valores de criticidad del método de cálculo Números Primos.
Tabla 7.6	Valores de criticidad del método de cálculo Base 2.
Tabla 7.7	Abreviaturas de aspectos operativos y grado de nivel de impacto.
Tabla 7.8	Criticidad de procesos por los 3 métodos de cálculo.
Tabla 7.9	Posiciones ordenadas de la criticidad de los procesos.
Tabla 7.10	Criticidad de tipos de equipos.
Tabla 7.11	Rangos de grupos de severidad de criticidad para el método de cálculo Base2.
Tabla 7.12	Representación en colores de los grupos de severidad de criticidad.
Tabla 7.13	Criticidad de equipos.
Tabla 7.14	Distribución de sistemas de niveles por grupos de severidad con representación en colores.

Tabla 7.15	Tipos de Características.
Tabla 7.16	Cantidad de variables por tipos de fiabilidad.
Tabla 7.17	Tipos de equipos de fiabilidad 1.
Tabla 7.18	Tipos de procesos de fiabilidad 1.
Tabla 7.19	Producto de trabajo de fiabilidad 1.
Tabla 7.20	Variables técnicas de fiabilidad 1.
Tabla 7.21	Tipos de producción de fiabilidad 1.
Tabla 7.22	Variables legales de fiabilidad 1.
Tabla 7.23	Variables económicas de fiabilidad 1.
Tabla 7.24	Variables de intercambiabilidad de fiabilidad 1.
Tabla 7.25	Tipos de equipos de fiabilidad 2.
Tabla 7.26	Tipos de procesos de fiabilidad 2.
Tabla 7.27	Producto de trabajo de fiabilidad 2.
Tabla 7.28	Variables técnicas de fiabilidad 2.
Tabla 7.29	Tipos de producción de fiabilidad 2.
Tabla 7.30	Variables legales de fiabilidad 2.

Tabla 7.31	VARIABLES ECONÓMICAS DE FIABILIDAD 2.
Tabla 7.32	VARIABLES DE INTERCAMBIABILIDAD DE FIABILIDAD 2.
Tabla 7.33	Valor de criticidad de 10 equipos con el tipo de fiabilidad 1.
Tabla 7.34a	Valor de criticidad de 10 equipos con el tipo de fiabilidad 2.
Tabla 7.34b	Valor de criticidad de 10 equipos con el tipo de fiabilidad 2.
Tabla 7.34c	Valor de criticidad de 10 equipos con el tipo de fiabilidad 2.
Tabla 8.1	Modos de fallos y valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad, para tipo de equipo Máquinas Rotativas.
Tabla 8.2	Modos de fallos y valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad, para tipo de equipo Intercambio de Calor.
Tabla 8.3a	Modos de fallos y valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad, para tipo de equipo Depósitos.
Tabla 8.3b	Modos de fallos y valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad, para tipo de equipo Depósitos.
Tabla 8.4	Modos de fallos y valoración en frecuencia de fallos y detectabilidad, para tipo de equipo Valvulería.
Tabla 8.5	Tipos de gravedad en función de conceptos técnico-económicos.
Tabla 8.6	Frecuencias de fallos de tipologías de equipos de industria de procesos.
Tabla 8.7	Fuerza de empuje radial respecto el caudal de trabajo.

Tabla 8.8	Vida y NPR del modo de fallo rodamiento deteriorado, para diferentes puntos de trabajo respecto del punto de diseño de una bomba centrífuga.
Tabla 8.9a	Ponderación NPR en función de variación de factores, por equipos.
Tabla 8.9b	Ponderación NPR en función de variación de factores, por equipos.
Tabla 8.9c	Ponderación NPR en función de variación de factores, por equipos.
Tabla 8.10	Rango NPR en función de tipo de equipos.
Tabla 9.1	Plan estratégico de mantenimiento para NPR crítico.
Tabla 9.2	Plan estratégico de mantenimiento para NPR normal.
Tabla 9.3	Plan estratégico de mantenimiento para NPR poco importante.
Tabla 9.4	Ruta de mantenimiento preventivo con frecuencia 3 meses.
Tabla 9.5a	Costes de intervenciones por equipo.
Tabla 9.5b	Costes de intervenciones por equipo.
Tabla 9.6	Costes de mantenimiento por frecuencia y planta.
Tabla 9.7	Costes de mantenimiento tipos de equipo.
Tabla 10.1	Tipos de Incidencias y Equipos.
Tabla 10.2	Incidencias surgidas para mantenimiento durante un año.
Tabla 10.3	Coste de mantenimiento durante un año.

Tabla 10.4	Costes medios por tipos de incidencias durante un año.
Tabla 10.5	Valores de rangos de grupos de severidad.
Tabla 10.6	Incidencias en bombas de una planta de proceso.
Tabla 10.7	Costes en bombas de una planta de proceso.
Tabla 10.8	Incidencias en reactores en plantas de proceso.
Tabla 10.9	Costes en reactores de plantas de proceso.
Tabla 10.10	Valores de rangos de grupos de severidad para bombas y reactores.

### **Gráficas**

Gráfica 7.1	Comparación de métodos de cálculo de la criticidad respecto la logarítmica.
Gráfica 7.2	Comparación de métodos de cálculo de la criticidad respecto al Números Primos.
Gráfica 7.3	Comparación de métodos de cálculo de la criticidad respecto al Base2.
Gráfica 8.1	Fuerza de empuje radial respecto el caudal de trabajo.
Gráfica 8.2	Vida y NPR del modo de fallo rodamiento deteriorado, para diferentes puntos de trabajo respecto del punto de diseño de una bomba centrífuga.
Gráfica 10.1	Número de incidencias por tipos de equipos y tipos de incidencias.

Gráfica 10.2 Coste por tipos equipo y tipos de incidencias.

Gráfica 10.3 Coste medio por tipos de incidencia y tipo de equipo.

Gráfica 10.4 Coste por tipo de incidencias.

Gráfica 10.5 Comparativa % coste y % incidencias para tipos de equipo.

Gráfica 10.6 Medias coste / incidencia por tipo de incidencia.

Gráfica 10.7 Medias coste / incidencia por tipo de equipo.

Gráfica 10.8 % Incidencias según intervalos de cantidades de incidencias en bombas.

Gráfica 10.9 Comparativa % coste respecto % incidencias en bomba.

Gráfica 10.10 % Incidencias según intervalos de cantidades de incidencias en reactores.

Gráfica 10.11 Comparativa % coste respecto % incidencias en reactores.

### **Figuras**

Figura 4.1 Algoritmo RCM.

Figura 4.2 Estrategia de SAMI (Strategic Asset Management Inc.).

Figura 4.3 Modelo BMM (Business Maintenance Model) de Asset Management de PMM Institute For Learning.

- Figura 4.4 Esquema de implantación de Mantenimiento Preventivo y Predictivo.
- Figura 5.1 Protocolo de Mejora de Metodología RCM a partir del AMFEC e implantación de Mantenimiento Preventivo y Predictivo en Industrias de Procesos.
- Figura 8.1 Espacio vectorial  $R^5$  para el cálculo del  $NPR_{MICROSCÓPICO}$ .
- Figura 10.1 Esquema Organización de la Información en Industria de Procesos.
- Figura 10.2 Etapa Organización de Activos. Sectores.
- Figura 10.3 Etapa Organización de Activos. Tecnologías.
- Figura 10.4 Etapa Selección Activos para Estudio.
- Figura 10.5 Etapa Extracción de Ratios y Comparativa.
- Figura 10.6 Etapa Selección de Problema y Soluciones.