

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
GESTIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD
PARA UNA EMPRESA MANUFACTURERA DE FIDEOS**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DE GRADO DE MAGÍSTER (MSc.) EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL Y PRODUCTIVIDAD**

ÁNGEL CRISTÓBAL NAVAS MURMINACHO
e-mail: acnavasm@yahoo.com.mx

DIRECTOR: ING. ÁLVARO AGUINAGA MSc., Ph.D.
e-mail: alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

Quito, enero de 2012

© Escuela Politécnica Nacional 2012
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Angel Cristóbal Navas Murminacho, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Angel Cristóbal Navas Murminacho

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Angel Cristóbal Navas Murminacho, bajo mi supervisión.

Ing. Álvaro Aguinaga MSc. Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Al concluir el presente proyecto, dejo constancia de mi agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra manera han colaborado para su culminación.

A mi familia y amigos por su valioso tiempo y dedicación.

A la Escuela Politécnica Nacional, en su nombre a todos los profesores y personal administrativo de la Maestría en Ingeniería Industrial y Productividad, por su ayuda e inestimable guía en el proceso de aprendizaje.

A mi director de Proyecto Ing. Álvaro Aguinaga, por su tiempo y su valioso aporte de conocimientos.

DEDICATORIA

Este trabajo está cariñosamente dedicado a la memoria de mi madre

María Luisa

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xvii
INTRODUCCIÓN	xviii
GLOSARIO	xx
1. PARTE TEÓRICA	1
1.1. CONFIABILIDAD	1
1.1.1. Introducción a la confiabilidad	1
1.1.1.1. Definición básica	2
1.1.1.2. Funciones de estado	2
1.1.2. Estructuras de sistemas	3
1.1.2.1. Sistema serie	3
1.1.2.2. Sistema paralelo	4
1.1.2.3. Sistema k de n	5
1.1.3. Introducción matemática de variables aleatorias	6
1.1.3.1. La función de distribución	8
1.1.3.2. La función densidad de distribución	9
1.1.3.3. Características numéricas de las variables aleatorias	10
1.1.4. Confiabilidad e infiabilidad	11
1.1.4.1. Función de repartición	11
1.1.4.2. Tasa de fallo	12
1.1.4.3. Tasa de fallos instantánea	14
1.1.4.4. Función de densidad de probabilidad de fallos	16
1.1.4.5. Relación entre $f(t)$, $\lambda(t)$ y $R(t)$	16
1.1.4.6. La curva Davies o de la bañera	17
1.1.5. Tipos de ensayos en confiabilidad	18
1.1.5.1. Datos completos o datos no censurados	18
1.1.5.2. Datos censurados	18
1.1.5.2.1. Tipo I:	18
1.1.5.2.2. Tipo II:	19
1.1.6. Distribuciones de fallo	19
1.1.6.1. La distribución exponencial	20
1.1.6.1.1. Tiempo medio hasta un fallo MTTF	20
1.1.6.1.2. Tiempo medio entre fallos MTBF	21
1.1.6.1.3. Curva de supervivencia	21
1.1.6.1.4. Vida útil	23
1.1.6.2. El modelo de Weibull	23

1.1.6.2.1.	Gráficos $f(t)$ y $\lambda(t)$	24
1.1.6.2.2.	Expresiones matemáticas	24
1.1.6.2.2.1.	Densidad de probabilidad $f(t)$	24
1.1.6.2.2.2.	Función de repartición $F(t)$	25
1.1.6.2.2.3.	Tasa instantánea de fallo $\lambda(t)$	25
1.1.6.2.2.4.	Duración de vida t asociada a un nivel de confiabilidad $R(t)$	26
1.1.6.3.	Distribución de Poisson	27
1.1.7.	Procesos de desgaste y fallo	27
1.1.7.1.	Origen de las fallas	29
1.1.7.1.1.	Mal diseño o error de cálculo en las máquinas o equipos:	29
1.1.7.1.2.	Defectos de fabricación de las instalaciones, máquinas o equipos:	29
1.1.7.1.3.	Mal uso de las instalaciones, máquinas o equipos:	29
1.1.7.1.4.	Desgaste natural o envejecimiento por el uso:	29
1.1.7.1.5.	Fenómenos naturales y otras causas:	29
1.1.7.2.	Modelos de fallos	30
1.2.	ESTUDIO DE MANTENIBILIDAD	32
1.2.1.	El concepto de perfil de funcionabilidad	32
1.2.1.1.	Sistemas no recuperables	33
1.2.1.2.	Sistemas recuperables	34
1.2.2.	La importancia de la disponibilidad	34
1.2.3.	La mantenibilidad como determinante de la disponibilidad	35
1.2.4.	La definición de la mantenibilidad	36
1.2.5.	Enfoque de la mantenibilidad basado en el tiempo empleado	37
1.2.5.1.	Medidas de la mantenibilidad	40
1.2.5.2.	Características de la mantenibilidad	41
1.2.5.2.1.	La función de mantenibilidad	41
1.2.5.2.2.	Tiempo esperado de recuperación	41
1.2.5.2.3.	Relación entre Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad	42
1.2.5.2.3.1.	MTBF y MTTR	43
1.2.6.	La evaluación antropométrica de la mantenibilidad	44
1.3.	ESTUDIO COMPARATIVO DEL MANTENIMIENTO	45
1.3.1.	El proceso de mantenimiento	45
1.3.1.1.	Análisis del proceso de mantenimiento	47
1.3.1.1.1.	Objetivos de las tareas de mantenimiento	47
1.3.1.1.2.	Recursos	47
1.3.1.1.3.	Restricciones	48
1.3.1.2.	El mantenimiento y la disponibilidad	49
1.3.1.3.	El mantenimiento y la seguridad	49
1.3.1.4.	El mantenimiento y la economía	49
1.3.2.	Análisis de las tareas de mantenimiento	50

1.3.2.1.	Duración de la tarea de mantenimiento	51
1.3.2.2.	Clasificación de las tareas de mantenimiento	53
1.3.3.	Tipos de mantenimiento	53
1.3.3.1.	Clasificación del mantenimiento conforme a las normas AFNOR X60010 y 60011	54
1.3.3.2.	Mantenimiento correctivo	55
1.3.3.3.	Mantenimiento modificativo	55
1.3.3.4.	Mantenimiento preventivo	56
1.3.3.4.1.	Mantenimiento Sistemático	57
1.3.3.4.2.	Mantenimiento Condicional o Predictivo	57
1.3.3.4.2.1.	Parámetros de vigilancia de la condición	58
1.3.3.4.2.2.	Técnicas de ensayo no destructivos	58
1.3.4.	Mantenimiento productivo total “TPM” versus RCM	59
1.3.4.1.	Introducción al TPM	59
1.3.4.2.	Estrategia de las 5S	60
1.3.4.3.	Optimizando el TPM	61
1.3.5.	Costos de mantenimiento	62
1.3.5.1.	Costos fijos	62
1.3.5.2.	Costos variables	62
1.3.5.3.	Costos financieros	63
1.3.5.4.	Costo por falla	63
1.3.5.5.	Costo total de mantenimiento	64
1.3.5.6.	Costo óptimo o de equilibrio	64
1.4.	INTRODUCCIÓN AL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD	66
1.4.1.	Evolución del mantenimiento	66
1.4.1.1.	La Primera Generación	67
1.4.1.2.	La Segunda Generación	67
1.4.1.3.	La Tercera Generación	68
1.4.1.3.1.	Nuevas expectativas	68
1.4.1.3.2.	Nuevas Investigaciones	69
1.4.1.3.3.	Nuevas Técnicas	70
1.4.2.	Definición de RCM	71
1.4.3.	Bases conceptuales	72
1.4.4.	Confiabilidad operacional	72
1.4.4.1.	Confiabilidad Humana	73
1.4.4.2.	Confiabilidad de los Procesos	73
1.4.4.3.	Mantenibilidad de equipos	74
1.4.4.4.	Confiabilidad de los equipos	74
1.5.	HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS	75
1.5.1.	Análisis de causa raíz (ACR)	75

1.5.1.1.	Aplicación del Análisis Causa Raíz	76
1.5.2.	Análisis de criticidad	77
1.5.3.	Herramientas para el análisis de averías	78
1.5.3.1.	Histogramas	79
1.5.3.2.	Diagrama de Pareto	79
1.5.3.3.	Diagrama de Ishikawa	80
1.5.3.4.	Análisis de Árbol de Fallos	80
1.5.4.	La norma SAE JA1011	81
2.	METODOLOGÍA	82
2.1.	DESARROLLO DEL MODELO DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)	82
2.1.1.	Definir los activos físicos	82
2.1.2.	RCM: Las siete preguntas básicas	83
2.1.3.	Funciones y sus estándares de funcionamiento, contexto operacional	83
2.1.3.1.	Funciones	84
2.1.3.2.	Estándares de funcionamiento	84
2.1.3.2.1.	Estándares de funcionamiento múltiple	86
2.1.3.2.2.	Estándares de funcionamiento cuantitativos	87
2.1.3.2.3.	Estándares cualitativos	87
2.1.3.2.4.	Estándares de funcionamiento absolutos	87
2.1.3.2.5.	Estándares de funcionamiento variables	87
2.1.3.2.6.	Límites superiores e inferiores	88
2.1.3.3.	El Contexto Operacional	88
2.1.3.3.1.	Procesos por lotes y continuos	89
2.1.3.3.2.	Redundancia	89
2.1.3.3.3.	Estándares de calidad	90
2.1.3.3.4.	Estándares medio ambientales	90
2.1.3.3.5.	Riesgos para la seguridad	90
2.1.3.3.6.	Turnos de trabajo	90
2.1.3.3.7.	Productos en proceso	91
2.1.3.3.8.	Tiempo de reparación	91
2.1.3.3.9.	Repuestos	92
2.1.3.3.10.	Demanda del mercado	92
2.1.3.3.11.	Abastecimiento de materias primas	92
2.1.3.3.12.	Documentación del contexto operacional	92
2.1.3.4.	Tipos de funciones	93
2.1.3.4.1.	Funciones primarias	93
2.1.3.4.1.1.	Funciones primarias múltiples e independientes	94
2.1.3.4.1.2.	Funciones primarias dependientes o en serie	94
2.1.3.4.2.	Funciones secundarias	94
2.1.3.4.2.1.	Ecología e integridad ambiental	95
2.1.3.4.2.2.	Seguridad	95
2.1.3.4.2.3.	Integridad estructural	95

2.1.3.4.2.4.	Control	95
2.1.3.4.2.5.	Contención	95
2.1.3.4.2.6.	Confort	96
2.1.3.4.2.7.	Apariencia	96
2.1.3.4.2.8.	Protección	96
2.1.3.4.2.9.	Economía/eficiencia	96
2.1.3.4.2.10.	Funciones superfluas	97
2.1.3.5.	Cómo deben listarse las funciones	97
2.1.4.	Fallas funcionales	97
2.1.4.1.	Falla	97
2.1.4.2.	Fallas Funcionales	98
2.1.4.2.1.	Funciones y fallas	98
2.1.4.2.2.	Estándares de funcionamiento y Fallas	98
2.1.4.2.2.1.	Falla total y parcial	99
2.1.4.2.2.2.	Límites superiores e inferiores	100
2.1.4.2.2.3.	Medidores e indicadores	100
2.1.4.2.2.4.	Fallas funcionales y contexto operacional	100
2.1.4.3.	Cómo deben ser registradas las Fallas Funcionales	101
2.1.5.	Análisis de modos de falla y sus efectos (AMFE)	101
2.1.5.1.	Modo de Falla	101
2.1.5.2.	Importancia del análisis de los Modos de Falla	102
2.1.5.3.	Categorías de Modos de Falla	103
2.1.5.3.1.	Capacidad decreciente	103
2.1.5.3.1.1.	Deterioro	104
2.1.5.3.1.2.	Fallas de Lubricación	104
2.1.5.3.1.3.	Polvo o Suciedad	105
2.1.5.3.1.4.	Desarme	105
2.1.5.3.1.5.	Errores humanos que reducen la capacidad	105
2.1.5.3.2.	Aumento del Funcionamiento Deseado (o aumento del Esfuerzo Aplicado)	105
2.1.5.3.2.1.	Sobrecarga deliberada constante	106
2.1.5.3.2.2.	Sobrecarga no intencional constante	107
2.1.5.3.2.3.	Sobrecarga no intencional repentina	107
2.1.5.3.2.4.	Materias primas y materiales de empaque incorrecto	107
2.1.5.3.3.	Capacidad inicial	107
2.1.5.4.	Detalle de los Modos de Falla	108
2.1.5.4.1.	Causalidad	108
2.1.5.4.2.	Probabilidad	109
2.1.5.4.3.	Consecuencias	109
2.1.5.4.4.	Causas versus Efecto	109
2.1.5.4.5.	Modos de falla y el contexto operacional	110
2.1.5.5.	Efectos de Falla	110
2.1.5.5.1.	Evidencia de Falla	111
2.1.5.5.2.	Riesgos para la Seguridad y el Medio Ambiente	111
2.1.5.5.3.	Daños Secundarios y Efectos en la Producción	111
2.1.5.5.4.	Acción Correctiva	112
2.1.5.6.	Fuentes de Información acerca de Modos y Efectos	112

2.1.5.6.1.	El fabricante o proveedor del equipo	113
2.1.5.6.2.	Listas genéricas de modos de falla	113
2.1.5.6.3.	Otros usuarios de la misma maquinaria	113
2.1.5.6.4.	Registros de antecedentes técnicos	113
2.1.5.6.5.	Las personas que operan y mantienen el equipo	114
2.1.5.7.	Niveles de Análisis y la Hoja de Información	114
2.1.5.7.1.	Nivel de Análisis	114
2.1.5.7.1.1.	Comenzando en un nivel bajo	115
2.1.5.7.1.2.	Comenzando desde arriba	115
2.1.5.7.1.3.	Niveles intermedios	116
2.1.5.7.2.	Cómo deben Documentarse los Modos de Falla y sus Efectos	116
2.1.5.7.2.1.	Opción 1	116
2.1.5.7.2.2.	Opción 2	117
2.1.5.7.2.3.	Opción 3	117
2.1.5.7.2.4.	Opción 4	117
2.1.5.7.2.5.	Servicios	117
2.1.5.7.2.6.	Hoja de Información completa	118
2.1.6.	Consecuencias de falla	118
2.1.6.1.	Técnicamente Factible y Merecer la Pena	118
2.1.6.2.	Funciones Ocultas y Evidentes	119
2.1.6.2.1.	Categorías de Fallas Evidentes:	119
2.1.6.3.	Consecuencias para la Seguridad y el Medio Ambiente	120
2.1.6.3.1.	La Seguridad ante todo	120
2.1.6.3.2.	La Cuestión del Riesgo	120
2.1.6.3.3.	Seguridad y Mantenimiento Proactivo	122
2.1.6.4.	Consecuencias Operacionales	123
2.1.6.4.1.	Cómo las Fallas Afectan a las Operaciones	123
2.1.6.4.2.	Evitando Consecuencias Operacionales	123
2.1.6.5.	Consecuencias No Operacionales.	125
2.1.6.6.	Consecuencias de Fallas Ocultas	125
2.1.6.6.1.	Dispositivos de protección con seguridad inherente	125
2.1.6.6.2.	Dispositivos de seguridad que no cuentan con seguridad inherente	126
2.1.6.6.3.	Mantenimiento de Rutina y Funciones Ocultas	128
2.1.6.6.4.	Funciones Ocultas: El Proceso de Decisión	128
2.1.7.	Tareas de mantenimiento	130
2.1.7.1.	Mantenimiento Proactivo: Tareas Preventivas	131
2.1.7.1.1.	Edad y Deterioro	131
2.1.7.1.2.	Fallas relacionadas con la Edad y Mantenimiento Preventivo	133
2.1.7.1.3.	Tareas de Reacondicionamiento y Sustitución Cíclica	134
2.1.7.1.3.1.	La Frecuencia de Tareas de Reacondicionamiento y Sustitución Cíclica	135
2.1.7.1.3.2.	La Factibilidad Técnica del Reacondicionamiento Cíclico	136
2.1.7.1.3.3.	La Factibilidad Técnica de la Sustitución Cíclica	136
2.1.7.1.3.4.	La efectividad de las Tareas de Reacondicionamiento Cíclico	137
2.1.7.1.4.	Fallas no Asociadas con la Edad	137
2.1.7.2.	Mantenimiento Proactivo: Tareas Predictivas	139
2.1.7.2.1.	Fallas Potenciales y Mantenimiento a Condición	139

2.1.7.2.2.	El Intervalo P-F	140
2.1.7.2.3.	Factibilidad Técnica de Tareas a Condición.	142
2.1.7.2.4.	Categorías de Técnicas a Condición	143
2.1.7.2.4.1.	Técnicas de monitoreo de condición	143
2.1.7.2.4.2.	Técnicas basadas en variaciones de la calidad del producto	144
2.1.7.2.4.3.	Técnicas de monitoreo de los efectos primarios	144
2.1.7.2.4.4.	Técnicas de inspección basadas en los sentidos humanos	145
2.1.7.2.4.5.	Selección de la categoría correcta	145
2.1.7.2.5.	Cómo determinar el Intervalo P-F	146
2.1.7.2.5.1.	Observación continua	146
2.1.7.2.5.2.	Comenzar con un intervalo corto y extenderlo gradualmente	146
2.1.7.2.5.3.	Intervalos arbitrarios	146
2.1.7.2.5.4.	Investigación	147
2.1.7.2.5.5.	Un enfoque racional	147
2.1.7.2.6.	Cuándo vale la pena realizar tareas a condición	148
2.1.7.2.7.	Selección de tareas proactivas	148
2.1.7.2.7.1.	Tareas a condición	148
2.1.7.2.7.2.	Tareas de reacondicionamiento y de sustitución cíclica	149
2.1.7.2.7.3.	Combinación de tareas	149
2.1.7.2.7.4.	El proceso de selección de tareas	150
2.1.7.3.	Acciones “a Falta de”: Tareas de búsqueda de fallas	150
2.1.7.3.1.	Búsqueda de falla	151
2.1.7.3.1.1.	Fallas múltiples y búsqueda de fallas	152
2.1.7.3.1.2.	Aspectos técnicos de la búsqueda de fallas	153
2.1.7.3.2.	Intervalos de tareas de búsqueda de falla	154
2.1.7.3.2.1.	Métodos rigurosos para calcular FFI	155
2.1.7.3.2.2.	Fuentes de datos para los cálculos de FFI	156
2.1.7.3.2.3.	Un enfoque informal para ajustar Intervalos de búsqueda de falla	157
2.1.7.3.2.4.	Otros métodos para calcular Intervalos de búsqueda de falla	157
2.1.7.3.2.5.	La practicidad de los Intervalos de Tareas	157
2.1.7.3.3.	La factibilidad técnica de la Búsqueda de falla	158
2.1.7.4.	Otras Acciones “a Falta de”	159
2.1.7.4.1.	Ningún mantenimiento programado	159
2.1.7.4.2.	Rediseño	160
2.1.7.4.2.1.	Diseño y mantenimiento	160
2.1.7.4.2.2.	El rediseño como acción “a falta de”	161
2.1.7.4.3.	Recorridas de Inspección	164
2.1.8.	El diagrama de decisión de RCM	164
2.1.8.1.	El proceso de Decisión de RCM	164
2.1.8.1.1.	Consecuencias de la falla	167
2.1.8.1.2.	Tareas Proactivas	168
2.1.8.1.3.	Las preguntas a “a Falta de”	169
2.1.8.1.4.	Tarea propuesta	170
2.1.8.1.5.	Intervalo inicial	170
2.1.8.1.6.	A realizarse por	171
2.1.9.	Implementando las recomendaciones de RCM	171

2.1.9.1.	Implementación – Los pasos clave	171
2.1.9.2.	La Auditoría de RCM	172
2.1.9.2.1.	Quién debe hacer la auditoría	172
2.1.9.2.2.	Cuándo debe realizarse la auditoría	174
2.1.9.2.3.	Qué implica la auditoría	174
2.1.9.3.	Descripción de tareas	175
2.1.9.3.1.	Información básica	175
2.1.9.3.2.	ISO 9000 y RCM	176
2.1.9.4.	Implementando cambios a realizar por única vez	176
2.1.9.4.1.	Cambios en la configuración física	176
2.1.9.4.2.	Cambios en la manera en que se opera la planta	176
2.1.9.4.3.	Cambios en las capacidades de las personas	176
2.1.9.5.	Grupos de tareas	177
2.1.9.5.1.	Procedimientos operativos estándar	177
2.1.9.5.2.	Planes de mantenimiento	178
2.1.9.5.2.1.	Consolidación de frecuencias	178
2.1.9.5.2.2.	Contradicciones	179
2.1.9.5.2.3.	Incorporando tareas	179
2.1.9.6.	Sistemas de planeamiento y control	179
2.1.9.6.1.	Programas de Mantenimiento de Alta y Baja Frecuencia	180
2.1.9.6.2.	Programas realizados por los Operarios	180
2.1.9.6.3.	Programas y Controles de calidad	181
2.1.9.6.4.	Programas de alta frecuencia realizados por el personal de mantenimiento	181
2.1.9.6.4.1.	Emitiendo programas de alta frecuencia	183
2.1.9.6.4.2.	Controlando los programas de alta frecuencia	184
2.1.9.6.5.	Programas de baja frecuencia hechos por el personal de mantenimiento	184
2.1.9.6.5.1.	Planeamiento basado en el tiempo transcurrido	184
2.1.9.6.5.2.	Planeamiento basado en el tiempo de funcionamiento	185
2.1.9.6.5.3.	Organizando programas de baja frecuencia	185
2.1.9.6.5.4.	Controlando los programas de baja frecuencia	186
2.1.9.7.	Reportando Defectos	186
2.1.10.	Aplicación del proceso RCM	187
2.1.10.1.	Planeamiento	188
2.1.10.2.	Los Grupos de Revisión RCM	189
2.1.10.2.1.	Qué hace cada grupo	190
2.1.10.2.2.	Qué obtienen los participantes del proceso	191
2.1.10.3.	Facilitadores	192
2.1.10.3.1.	Aplicar la Lógica RCM	192
2.1.10.3.2.	Dirigir el Análisis	192
2.1.10.3.3.	Conducir las Reuniones	194
2.1.10.3.4.	Administrar el Tiempo	195
2.1.10.3.5.	Administrar la Logística e Interacción con los Niveles Superiores	196
2.1.10.4.	Estrategias de Implementación	197
2.1.10.4.1.	El Enfoque de la Fuerza de Tareas	197
2.1.10.4.2.	El Enfoque Selectivo	197
2.1.10.4.3.	El Enfoque Amplio	198

2.1.10.4.4. Decidiendo qué enfoque usar	200
2.2. ANÁLISIS DE COSTO BENEFICIO DE LA APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RCM	200
2.2.1. Efectividad del mantenimiento	201
2.2.1.1. Diferentes maneras de medir la efectividad del Mantenimiento	202
2.2.1.2. Expectativas diferentes	203
2.2.1.3. Diferentes funciones	204
2.2.1.4. Estándares de desempeño múltiples y el OEE	204
2.2.2. Eficiencia del mantenimiento	206
2.2.2.1. Costos de mantenimiento	206
2.2.2.2. Mano de obra	207
2.2.2.3. Repuestos y materiales	208
2.2.2.4. Planificación y control	208
2.2.3. OEE - Efectividad global de equipos	209
2.2.4. Beneficios del RCM	210
2.2.4.1. Mayor seguridad e Integridad Ambiental	210
2.2.4.2. Mayor disponibilidad y Confiabilidad de Planta	211
2.2.4.3. Mejor calidad del Producto	213
2.2.4.4. Mayor eficiencia del Mantenimiento (Costo-efectividad)	213
2.2.4.4.1. Menos mantenimiento de rutina	214
2.2.4.4.2. Mejor contratación de servicios de mantenimiento	214
2.2.4.4.3. Menor necesidad de usar expertos caros	214
2.2.4.4.4. Especificaciones más claras para la adquisición de nueva tecnología de mantenimiento	215
2.2.4.5. Vida útil más larga de ítems caros	215
2.2.4.6. Mayor motivación de los individuos	215
2.2.4.7. Mejor trabajo en Equipo	216
2.2.4.8. Una base de datos de Mantenimiento	216
2.2.4.9. Un marco de referencia integrador	217
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	218
3.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA	218
3.1.1. Descripción de la organización “Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A.	218
3.1.1.1. Estructura Organizacional	219
3.1.1.2. Productos de la Organización	220
3.1.2. Procesos de la organización	221
3.1.2.1. Procesos Estratégicos:	221
3.1.2.2. Procesos Productivos:	221
3.1.2.3. Procesos de Apoyo	222
3.1.2.4. Proceso de Fabricación	222
3.1.2.4.1. Proceso de fabricación de Semolina	222

3.1.2.4.2.	Proceso de fabricación de Pasta	222
3.1.2.5.	Proceso de Mantenimiento	223
3.1.2.6.	Proceso de mantenimiento de la Planta Molinos	226
3.2.	DESARROLLO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD	229
3.2.1.	Capacitación del personal involucrado en el proceso	230
3.2.1.1.	Capacitación a la Alta Gerencia	231
3.2.1.2.	Capacitación al personal de producción y mantenimiento	232
3.2.2.	Estrategia de implementación	235
3.2.2.1.	Análisis de criticidad de los Equipos de la Planta Molinos	236
3.2.2.1.1.	Establecimiento de criterios	236
3.2.2.1.2.	Lista Jerarquizada de Activos	238
3.2.3.	Definición del contexto operacional	243
3.2.3.1.	Factores del Contexto Operacional	243
3.2.3.1.1.	Procesos	243
3.2.3.1.1.1.	Recepción	243
3.2.3.1.1.2.	Acondicionamiento	244
3.2.3.1.1.3.	Molienda	245
3.2.3.1.2.	Redundancia	251
3.2.3.1.3.	Estándares de Calidad	251
3.2.3.1.3.1.	Estándares del trigo en la recepción	251
3.2.3.1.3.2.	Estándar del trigo acondicionado	252
3.2.3.1.3.3.	Estándar del producto terminado	252
3.2.3.1.4.	Estándares medio ambientales	254
3.2.3.1.5.	Riesgos para la seguridad	255
3.2.3.1.6.	Turnos de trabajo	255
3.2.3.1.7.	Productos en proceso	255
3.2.3.1.8.	Repuestos	256
3.2.3.1.9.	Demanda del mercado	256
3.2.3.1.10.	Abastecimiento de materias primas	256
3.2.3.2.	Caracterización de los activos	257
3.2.3.3.	Jerarquía de los activos	257
3.2.4.	Grupo de revisión RCM	262
3.2.5.	Implementación del modelo del sistema de gestión de mantenimiento centrado en confiabilidad	262
3.2.5.1.	Reuniones del grupo de revisión RCM	264
3.2.5.2.	Filtro de molienda MVRS 39/24	265
3.2.5.2.1.	Neumático de Alta Presión	265
3.2.5.2.2.	Válvula Maua	266
3.2.5.2.3.	Neumático de Baja Presión	266
3.2.5.2.4.	Sistema de aire de barrido	266
3.2.5.2.5.	Depósitos del sistema	267
3.2.5.2.6.	Válvula de seguridad	267
3.2.5.2.7.	Límites del sistema	267

3.2.5.2.8. Hojas de Información y Hojas de Decisión RCM	268
3.2.5.3. Plansifter MPAE	289
3.2.5.3.1. Límites del sistema	290
3.2.5.3.2. Hojas de Información y Hojas de Decisión RCM	291
3.2.6. Implementación de las recomendaciones de RCM	299
3.2.6.1. La Auditoría de RCM	299
3.2.6.2. Sistemas de planeamiento y control	300
3.2.7. Análisis de costo beneficio	312
3.2.8. Análisis de resultados	315
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	317
4.1. CONCLUSIONES	317
4.2. RECOMENDACIONES	318
BIBLIOGRAFÍA	320
ANEXOS	323

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 2.1: Intervalos de búsqueda de falla, disponibilidad y confiabilidad	155
Tabla 3.1: Criterios para la determinación de la criticidad de los activos	237
Tabla 3.2: Lista jerarquizada de activos de la planta Molinos	239
Tabla 3.3: Lista jerarquizada de activos de la planta Molinos. Continuación...	240
Tabla 3.4: Lista jerarquizada de activos de la planta Molinos. Continuación...	241
Tabla 3.5: Resultados de Criticidad	242
Tabla 3.6: Parámetros para la recepción del trigo	251
Tabla 3.7: Humedad Relativa del trigo acondicionado	252
Tabla 3.8: Parámetros del producto terminado	253
Tabla 3.9: Granulometría de la harina	253
Tabla 3.10: Granulometría de la sémola	253
Tabla 3.11: Granulometría de la semolina	254

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1.1: Sistema Serie de tres componentes	4
Figura 1.2: Sistema Paralelo de tres componente	5
Figura 1.3: Sistema k-de-n	6
Figura 1.4: Función de distribución	8
Figura 1.5: Función de densidad de distribución	10
Figura 1.6: Función de repartición	12
Figura 1.7: La tasa de fallos, Dominio Mecánico	13
Figura 1.8: La tasa de fallos, Dominio Electrónico	13
Figura 1.9: Representación gráfica de los parámetros de confiabilidad	17
Figura 1.10: Curva típica de evolución de la “tasa de fallos”	17
Figura 1.11: Curva de supervivencia	22
Figura 1.12: Gráfica $f(t)$ y gráfica $\lambda(t)$ para el modelo de Weibull	24
Figura 1.13: Puntos de vista de los fallos de equipos	30
Figura 1.14: Perfil de funcionabilidad de un sistema de ingeniería no recuperable	34
Figura 1.15: Perfil de funcionabilidad de un sistema de ingeniería recuperable	34
Figura 1.16: Duración incierta del tiempo de recuperación	36
Figura 1.17: Enfoque de la Mantenibilidad basado en el tiempo empleado	38
Figura 1.18: Configuración del mantenimiento en varias realizaciones de una tarea de mantenimiento específica	39
Figura 1.19: Relación entre Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad	42
Figura 1.20: Relación entre los TBF y TTR	44
Figura 1.21: Dimensiones estructurales del cuerpo humano	45
Figura 1.22: El proceso de mantenimiento	46
Figura 1.23: Tarea de mantenimiento	50
Figura 1.24: Medidas de la Mantenibilidad	53
Figura 1.25: Clasificación del mantenimiento según Normas AFNOR	54
Figura 1.26: Costo óptimo o de equilibrio	65
Figura 1.27: Expectativas crecientes de mantenimiento	69
Figura 1.28: Cambios en los puntos de vista sobre la falla de equipos	69
Figura 1.29: Cambios en las técnicas de Mantenimiento	70
Figura 1.30: Sistema de confiabilidad Operacional	73
Figura 1.31: Etapas del ACR	77

Figura 1.32:	Modelo básico de Análisis de Criticidad	77
Figura 1.33:	Representación gráfica del Árbol de Fallos	81
Figura 2.1:	Capacidad inicial versus funcionamiento deseado	84
Figura 2.2:	Margen de deterioro	85
Figura 2.3:	Un activo físico mantenible	85
Figura 2.4:	Una situación no mantenible	86
Figura 2.5:	Estándares de funcionamiento variables	87
Figura 2.6:	Límites superiores e inferiores	88
Figura 2.7:	Estado general de falla	98
Figura 2.8:	Falla Funcional	99
Figura 2.9:	El activo sigue estando bien a pesar de cierto deterioro	100
Figura 2.10:	Modos de falla de una bomba	102
Figura 2.11:	Modos de falla, Categoría 1	104
Figura 2.12:	Modos de falla, Categoría 2	106
Figura 2.13:	Modos de falla, Categoría 3	107
Figura 2.14:	Tiempo de parada de máquina vs. tiempo de reparación	112
Figura 2.15:	Aceptabilidad de riesgo fatal	121
Figura 2.16:	Identificando y desarrollando una estrategia de mantenimiento para una falla que afecta la seguridad o el medio ambiente	123
Figura 2.17:	Identificando y desarrollando una estrategia de mantenimiento para una falla que tiene consecuencias operacionales	124
Figura 2.18:	Falla de un dispositivo de seguridad con “seguridad inherente”	126
Figura 2.19:	Falla de un dispositivo de protección cuya función es oculta	127
Figura 2.20:	Identificando y desarrollando una estrategia de mantenimiento para una función oculta	129
Figura 2.21:	La evaluación de las consecuencias de falla	130
Figura 2.22:	Absolutamente predecible	132
Figura 2.23:	Frecuencia de falla y “vida promedio”	132
Figura 2.24:	Probabilidad condicional de falla y “vida útil”	133
Figura 2.25:	El efecto de fallas prematuras	133
Figura 2.26:	Límites de vida-segura	136
Figura 2.27:	La curva P-F	139
Figura 2.28:	El intervalo P-F	140
Figura 2.29:	Intervalo P-F Neto	141
Figura 2.30:	Usando elementos de medición para mantenimiento a condición	144

Figura 2.31:	El proceso de selección de tareas	150
Figura 2.32:	Acciones a falta de	151
Figura 2.33:	Búsqueda de falla, el proceso de decisión	159
Figura 2.34:	Diagrama de decisión para una evaluación preliminar de una modificación propuesta	163
Figura 2.35:	El diagrama de decisión RCM	165
Figura 2.36:	Correlación de referencias entre las Hojas de Información y las Hojas de Decisión	166
Figura 2.37:	Cómo se registran las consecuencias de falla en la Hoja de Decisión	167
Figura 2.38:	Consecuencias de falla	168
Figura 2.39:	Criterios de factibilidad técnica	169
Figura 2.40:	Las preguntas “a falta de”	170
Figura 2.41:	Después de RCM	173
Figura 2.42:	Frecuencias de tareas consolidadas	178
Figura 2.43:	Un checklist para programas de mantenimiento de alta frecuencia	182
Figura 2.44:	Un grupo típico de revisión RCM	189
Figura 2.45:	El flujo de información en la base de datos RCM	190
Figura 3.1:	Organigrama Funcional de Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A.	220
Figura 3.2:	Diagrama del proceso de mantenimiento de Sucesores	224
Figura 3.3:	Diagrama del proceso de mantenimiento de Sucesores. Continuación...	225
Figura 3.4:	Diagrama del subproceso de mantenimiento de la Planta Molinos	227
Figura 3.5:	Diagrama del subproceso de mantenimiento de la Planta Molinos. Continuación...	228
Figura 3.6:	Diagrama del subproceso de Recepción	247
Figura 3.7:	Diagrama del subproceso de Acondicionamiento	248
Figura 3.8:	Diagrama del subproceso de Molienda	249
Figura 3.9:	Diagrama del subproceso de Molienda. Continuación...	250
Figura 3.10:	Jerarquía de los Activos de Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A.	258
Figura 3.11:	Jerarquía de los Activos de la Planta Molinos	259
Figura 3.12:	Jerarquía de los Activos de la Planta Molinos – Molienda	260
Figura 3.13:	Jerarquía de los Activos Planta Molinos –Molienda. Continuación...	261
Figura 3.14:	Diagrama funcional del proceso del sistema del Filtro de Molienda	268
Figura 3.15:	Diagrama funcional del proceso del plansifter MP AE	291

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Modelo de fallos	324
ANEXO II Hoja de Información RCM	325
ANEXO III Modos de falla con diferentes niveles de detalle	326
ANEXO IV Hoja de Decisión RCM	329
ANEXO V Caracterización de los activos en su diagrama de flujo de proceso	330

RESUMEN

El proyecto inició con un análisis detallado de conceptos necesarios para un cabal entendimiento de la metodología de gestión del mantenimiento denominada como “Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – RCM”. Se investigaron temas que tienen que ver con la denominada “teoría de la confiabilidad” o “ingeniería del riesgo” y la mantenibilidad. Se realizó también un estudio comparativo de las diferentes tendencias y conceptos tradicionales del mantenimiento, que de una u otra manera han constituido un punto de partida para el RCM. A continuación se realizó una investigación de la evolución del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad hasta llegar a lo que hoy se denomina el RCM2, que no es más que la aplicación del RCM al sector industrial y, un estudio de las principales herramientas de análisis, que constituyen un importante respaldo a la hora de llevar adelante las etapas del RCM.

Con tales fundamentos, se desarrolló un modelo de gestión para la aplicación del “Sistema del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – RCM” en cualquier organización del sector industrial, aunque sus concepciones en determinados puntos se orientan más a la industria manufacturera. De hecho, el logro más importante del presente proyecto constituye el tener un modelo coherente y plenamente estructurado, que permite implantar un sistema de gestión de RCM que puede ser evaluado con la norma SAE JA1011, a fin de poder ser denominado como RCM. Se concluyó este punto con el desarrollo de un análisis de costo-beneficio, que permite evaluar a la gestión de mantenimiento mediante indicadores de efectividad y de eficiencia.

El proyecto concluye con la aplicación del modelo de gestión de RCM a una organización industrial de manufactura. En esta etapa se realizó un análisis de los procesos de la organización y la definición del contexto operacional de la planta donde se realizó la implementación del modelo de RCM. Esta etapa concluye con los documentos de los análisis RCM a los activos seleccionados, después de que los mismos fueron sometidos a una auditoría RCM, para de ellos obtener las diferentes tareas de mantenimiento, que después de ser planificadas, serán ejecutadas a fin de asegurar que los activos continúen funcionando con la confiabilidad y disponibilidad requeridas.

INTRODUCCIÓN

En un sinnúmero de industrias de países como Ecuador, denominados en vías de desarrollo o del tercer mundo, la gestión del mantenimiento continúa siendo relegada a un segundo plano, pues aún se considera a dicha gestión como un gasto o, en el mejor de los casos, como un mal necesario, más no como una inversión, dando como resultado la existencia de departamentos de mantenimiento que muy difícilmente pueden ayudar a lograr los objetivos empresariales de las organizaciones a las que se pertenecen.

Por otra parte, la globalización es un dato que para bien o para mal las organizaciones actualmente deben tomar en cuenta. Bajo este panorama, el mantenimiento requiere un enfoque global que lo integre en el contexto empresarial con la importancia que se merece. Su rol destacado en la necesaria orientación a los negocios y resultados de la organización, es garantizado por su aporte a la competitividad a través de asegurar la confiabilidad de los activos de la organización. Por lo tanto, hoy en día es prioritario convertir al mantenimiento de ser el “mal necesario” de la producción, en un “factor clave” de la competitividad.

Esta meta puede ser alcanzada de forma óptima, con la implementación de la metodología de gestión del mantenimiento denominada **“Mantenimiento Centrado en confiabilidad” (RCM: Reliability Centered Maintenance)**, la cual es más que una estrategia de mantenimiento, es un modelo de pensamiento estratégico (Sotuyo, 2004).

El RCM ha venido siendo aplicado hace aproximadamente 30 años en la que es probablemente una de las áreas más exigentes del mantenimiento, la aviación civil, en donde ha sido puesto a prueba y pulido, más que ninguna otra técnica existente. De la aviación civil pasó a constituirse prácticamente en la gestión de mantenimiento oficial para la mayoría de organismos militares de países como Estados Unidos y Gran Bretaña. Posteriormente, fue adaptado y aplicado en una gran cantidad de organizaciones del sector industrial alrededor de mundo y con gran éxito. De hecho, las compañías que lo han aplicado y lo están aplicando, obtienen una ventaja comparativa, debido a que el mantenimiento, como se citó anteriormente, afecta directamente a la competitividad.

El RCM permite desarrollar un método organizado y lógico para construir o modificar un plan de mantenimiento a un costo justificable, basado en un procedimiento sistemático y estructurado para la determinación de los requerimientos de mantenimiento de los activos en su contexto operacional actual (Moubray, 2004).

El fuerte énfasis sobre las expectativas del usuario es una de las muchas características del RCM, que lo distinguen de otras técnicas menos rigurosas que esta filosofía. Otra fortaleza es el uso de grupos multidisciplinarios de análisis RCM de funcionalidad cruzada, de usuarios y personal de mantenimiento para aplicar el proceso. Con una cuidadosa capacitación, tales grupos son capaces de usar RCM para producir extraordinarios programas de mantenimiento con costos efectivos, aún en situaciones donde se tiene poco o ningún acceso a la información histórica.

La rigurosa aplicación del RCM transforma completamente la opinión que cualquier organización tiene de sus activos físicos. No sólo revoluciona opiniones acerca del mantenimiento sino que también conduce a un más amplio y más profundo conocimiento acerca de la forma como funcionan dichos activos y proceso de los cuales forman parte.

Desde el punto de vista de los negocios para los cuales el activo sirve, estos cambios son profundos y muy importantes. Ello significa que los activos se hacen más confiables porque son mantenidos en mejor forma, y los operarios probablemente harán menos cosas que ocasionen fallas en los activos.

El definitiva, la metodología de gestión del “Mantenimiento centrado en confiabilidad”, constituye una herramienta fundamental que sin duda alguna aportará una gran ventaja competitiva a las organizaciones de nuestro país que decidan implementarla, como ya lo ha hecho en cientos de compañías alrededor del mundo.

GLOSARIO

Confiability: probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, cuando opera en el entorno para el que ha sido diseñado.

Cambios de una sola vez: Cualquier acción realizada para cambiar la configuración física de un activo o sistema (rediseño o modificación), para cambiar el método usado por un operador o técnico de mantenimiento en el desarrollo de una tarea específica, para cambiar el contexto operativo del sistema, o para cambiar la capacidad de un operador o técnico de mantenimiento (entrenamiento).

Capacidad inicial: Nivel de rendimiento que un activo físico o sistema es capaz de realizar al momento de entrar en servicio.

Consecuencias a la seguridad: Un modo de falla o falla múltiple tiene consecuencias a la seguridad si puede lesionar o matar a una persona.

Consecuencias de Falla: La manera(s) en la cual los efectos de un modo de falla o falla múltiple tienen importancia. (Evidencia de falla, impacto en seguridad, medio ambiente, capacidad operacional, costos directos e indirectos de reparación).

Consecuencias medioambientales: Un modo de falla o falla múltiple tiene consecuencias medioambientales si es que podría incumplir cualquier norma o regulación medio ambiental empresarial, municipal, regional, nacional o internacional que se aplique al activo físico o sistema en consideración.

Consecuencias no operacionales: Una categoría de consecuencias de falla que no afectan negativamente a la seguridad, medio ambiente u operaciones, más sólo requiere reparación o reemplazo de cualquier elemento(s) que podría ser afectados por la falla.

Consecuencias operacionales: Una categoría de las consecuencias de falla que afectan negativamente la capacidad operacional de un activo físico o sistema (producción, calidad del producto, servicio al cliente, capacidad militar, o los costos de operación sumados a los costos de reparación).

Contexto operacional: Circunstancias en la cuales un activo físico o sistema se espera opere.

Disponibilidad: es la porción de tiempo durante la cual un sistema o equipo está en condiciones de ser usado. Es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionabilidad.

Dispositivo de protección o sistema de protección: Un dispositivo o sistema el cual está destinado para evitar, eliminar o minimizar las consecuencias de una falla de algún otro sistema.

Edad: Una medida de la exposición a un esfuerzo calculado a partir del momento en que un elemento o componente entra en servicio cuando es nuevo o reingresa al servicio después de una tarea concebida para restablecer su capacidad inicial, y puede ser medido en términos de tiempo calendario, tiempo de funcionamiento, distancia recorrida, ciclos de trabajo, unidades producidas o throughput.

Efecto de falla: Que sucede cuando un modo de falla ocurre.

Falla funcional: Un estado en el cual un activo físico o sistema está imposibilitado de realizar una función específica a un nivel de rendimiento deseado.

Falla evidente: Modo de fallo cuyos efectos se manifiestan al equipo de operación bajo circunstancias normales si el modo de falla ocurre por sí sólo.

Falla múltiple: Un evento que ocurre si una función protegida falla mientras su dispositivo de protección o sistema de protección está en un estado de falla.

Falla oculta: Modo de falla cuyos efectos no se manifiestan al equipo de operadores bajo circunstancias normales si el modo de falla ocurre por sí mismo.

Falla potencial: Una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está ocurriendo.

Función: Lo que el propietario o usuario de un activo físico o sistema necesita que realice.

Función evidente: Una función cuya falla se manifiesta por sí sola al equipo de operación bajo circunstancias normales.

Función oculta: Una función cuya falla por sí misma no se manifiesta al equipo de operación bajo circunstancias normales.

Función(es) Primaria(s): La(s) función(es) que constituye la(s) razón(es) más importante por la cual un activo físico o sistema es adquirido por su propietario o usuario.

Funcionabilidad: capacidad inherente de un elemento/sistema para desempeñar una función requerida con unas prestaciones especificadas, cuando es usado según se especifica.

Funcionalidad: capacidad inherente de un elemento/sistema para desempeñar una función específica.

Funciones secundarias: Funciones que un activo físico o sistema tiene que cumplir a parte de su(s) función(es) primaria(s), como aquellas necesitadas para cumplir requerimientos regulatorios los cuales pueden constituir aspectos como de protección, control, contención, confort, apariencia, eficiencia energética, e integridad estructural.

Intervalo P-F: El intervalo entre el punto en el cual una falla potencial llega a ser detectable y el punto en el cual decae en una falla funcional (también conocida como “periodo de desarrollo de falla” y “tiempo de evolución de falla”).

Mantenibilidad: es la probabilidad de que una máquina, equipo o un sistema pueda ser reparado a una condición especificada en un período de tiempo dado, en tanto su mantenimiento sea realizado de acuerdo con ciertas metodologías y recursos determinados con anterioridad.

Mantenimiento a la rotura: Una política de manejo de fallas que permite a un modo de falla específico ocurrir sin ningún intento de prever o prevenirlo.

Modo de falla: Evento único, el cual causa una falla funcional.

Política de gestión de fallas: Término genérico que abarca las tareas a condición, restitución programada, descarte programado, búsqueda de fallas, mantenimiento a rotura y cambios de una sola vez.

Probabilidad condicional de falla: La probabilidad de que una falla ocurra en un período específico siempre que el elemento concerniente haya sobrevivido a la etapa inicial de ese período.

Programación: Desarrollo planificado, intervalos predeterminados, incluyendo "monitoreo continuo" (donde el intervalo tiende a cero).

Propietario: Una persona u organización que podría sufrir o ser responsable de las consecuencias de un modo de fallo en virtud de ser el propietario del activo o sistema.

Reacondicionamiento cíclico: Una tarea programada que restituye la capacidad de un elemento antes o durante un intervalo especificado (edad límite), sin considerar su condición en ese momento, a un nivel que garantiza una probabilidad tolerable de supervivencia hasta el final de otro intervalo especificado.

Rendimiento esperado: El nivel de rendimiento esperado por el propietario o el usuario de un activo físico o sistema.

Sustitución cíclica: Una tarea programada que vincula el descarte de un elemento antes o en el tiempo límite especificado sin considerar su condición en ese momento.

Tareas a condición: Una tarea programada usada para detectar una falla potencial.

Tarea apropiada: Una tarea que es técnicamente factible y que vale la pena realizarse (aplicable y efectiva).

Tarea de búsqueda de fallas: Una tarea programada utilizada para determinar si una falla oculta específica ha ocurrido.

Usuario: Una persona u organización que opera un activo o sistema que podrían sufrir o ser responsable por las consecuencias de un modo de fallo del sistema.

1. PARTE TEÓRICA

1.1. CONFIABILIDAD

1.1.1. INTRODUCCIÓN A LA CONFIABILIDAD

El desarrollo de las concepciones y técnicas para el análisis de confiabilidad de componentes, equipos y sistemas ha estado asociado a la evolución de tecnologías complejas y de alto riesgo, tales como la aeronáutica, militar y nuclear. Sin embargo, con el devenir de los tiempos, se ha extendido ampliamente hacia el resto de la actividad industrial, confluyendo en un gran avance de los fundamentos y de los conceptos teóricos relacionados con la confiabilidad, produciéndose a la vez la consolidación de una *“Teoría de la Confiabilidad”* (Dhillon, 1999).

El campo de aplicación de la *“Teoría de la Confiabilidad”* o *“Ingeniería de Confiabilidad”* se amplía constantemente. Todos los sistemas de ingeniería, simples y complejos, pueden beneficiarse de la aplicación integrada de los conceptos de esta teoría en sus fases de planeación, diseño y operación. En la fase de operación y de mantenimiento de los equipos, los estudios de confiabilidad ayudan en la toma de decisiones sobre la calidad y frecuencia de los mantenimientos. Un aumento de la confiabilidad conlleva, en general, el aumento a corto plazo de los costos; pero este aumento de la confiabilidad puede revertirse en ganancia en un plazo mayor, y puede significar, por otra parte, una disminución de riesgos para la salud y la vida de las personas, y para el medio ambiente; factor este último de vital importancia en el contexto actual de toda actividad industrial (Amendola, 2006b).

Hoy en día existen muchos productos y sistemas modernos cuyo funcionamiento operativo depende de la efectividad conjunta de algunos de los factores siguientes: (1) el equipo físico; (2) el equipo humano; (3) el software; y (4) los protocolos de gestión (Nachlas, 1995). Es razonable y prudente intentar incluir la evaluación de todos estos factores en el estudio del comportamiento de los sistemas; sin embargo, debido al enfoque y limitación del presente estudio las descripciones estarán limitadas al comportamiento del equipo físico. Aquí, el

énfasis recae en el uso de modelos matemáticos para representar el comportamiento de los equipos.

La precisión en la predicción de la confiabilidad es también crucial desde el punto de vista económico. La confiabilidad de un equipo determina la productividad operativa del mismo, así como sus gastos de reparación y mantenimiento. Puede asimismo determinar el intervalo en que se distribuyen los costos operativos, en el que se obtienen ingresos o servicios. Por tanto, la confiabilidad es un factor central para determinar el costo del ciclo de vida de un producto.

1.1.1.1. Definición básica

En un sentido estrictamente técnico la Confiabilidad se define como:

“Confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, cuando opera en el entorno para el que ha sido diseñado” (Nachlas, 1995).

Como se observa la definición tiene cuatro atributos específicos; estos son: (1) probabilidad, (2) un funcionamiento adecuado, (3) calificación con respecto al entorno, y (4) tiempo (Nachlas, 1995). Estos cuatro atributos son importantes y se revisan a continuación.

1.1.1.2. Funciones de estado

El punto de partida para el estudio de la Confiabilidad es el funcionamiento adecuado o funcionamiento correcto. Inicialmente, no se define dicho funcionamiento de forma más específica. En cambio, se señala el hecho de que el complemento del funcionamiento correcto es el fallo. Por tanto, es menester iniciar el presente estudio analizando la dicotomía de que un dispositivo o bien funciona adecuadamente o ha fallado (Nachlas, 1995). Algebraicamente se afirma que un dispositivo tiene un estado Φ donde:

$$\Phi = \begin{cases} 1 & \text{si el dispositivo funciona} \\ 0 & \text{si el dispositivo ha fallado} \end{cases} \quad [1.1]$$

Ahora, supongamos que un dispositivo consta de n componentes y que el estado del dispositivo está determinado por el estado de dichos componentes; y se define:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad [1.2]$$

Como el vector de estado de los componentes, donde:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si el dispositivo } i \text{ funciona} \\ 0 & \text{si el dispositivo } i \text{ ha fallado} \end{cases}$$

Entonces se puede decir que el estado del dispositivo o sistema, Φ , es una función del vector de estado de los componentes:

$$\Phi = \Phi(\mathbf{x}) \quad [1.3]$$

Se supone que las relaciones físicas entre los componentes determinan la forma algebraica de la función Φ de estado del sistema.

1.1.2. ESTRUCTURAS DE SISTEMAS

Para considerar el atributo del funcionamiento correcto de Confiabilidad, es necesario analizar las estructuras básicas de los sistemas. Se reconoce en general que existen cuatro tipos genéricos de relaciones estructurales entre un dispositivo y sus componentes; estos son: serie, paralelo, k -de- n y, todas las demás (Nachlas, 1995).

1.1.2.1. Sistema serie

Un sistema serie es aquel en el que todos los componentes deben funcionar adecuadamente para que funcione el sistema.

La analogía conceptual a la estructura serie es un circuito eléctrico de tipo serie. Sin embargo, a diferencia de un circuito serie, esto no implica específicamente que los componentes deban estar conectados físicamente en secuencia. Más bien, lo importante es que funcionen todos los componentes. Un ejemplo de sistema serie en el que los componentes no están físicamente conectados es el conjunto de neumáticos de un coche.

El concepto de un circuito serie se utiliza generalmente para definir una representación gráfica de una estructura serie, como lo muestra la Figura 1.1; denominándose diagramas de bloque a las representaciones de estructuras de sistemas.

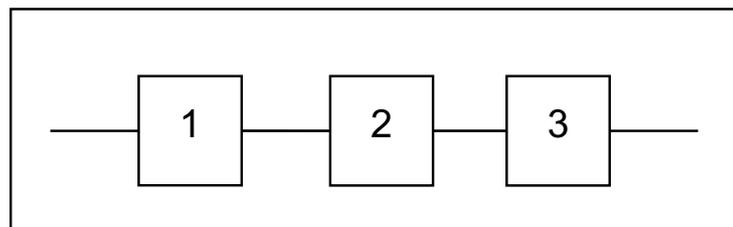


Figura 1.1. Sistema Serie de tres componentes

En la estructura serie, la necesidad de que todos los componentes funcionen para que el sistema lo haga implica que $\Phi(x) = 1$ si $x_i = 1 \forall i$, y 0 de otro modo. Para el sistema serie de la figura 1.1, se puede tener las siguientes posibilidades:

$$x_1 = x_3 = 1 \quad \text{y} \quad x_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \Phi(x) = 0$$

$$x_2 = x_3 = 0 \quad \text{y} \quad x_1 = 1 \quad \Rightarrow \quad \Phi(x) = 0$$

$$x_1 = x_2 = x_3 = 1 \quad \Rightarrow \quad \Phi(x) = 1$$

Como se puede observar, sólo el funcionamiento de todos los componentes hace que el sistema lo haga.

1.1.2.2. Sistema paralelo

Un sistema paralelo es aquel en que el funcionamiento de cualquiera de los componentes implica el del sistema.

Esto no implica ninguna conexión física entre los componentes, por la definición o por el diagrama de bloques. El diagrama de bloques para un sistema paralelo de tres componentes es el mostrado en la Figura 1.2.

Un ejemplo de un sistema paralelo es el conjunto de dos motores en un avión bimotor; mientras que funcione al menos un motor, el vuelo se mantiene.

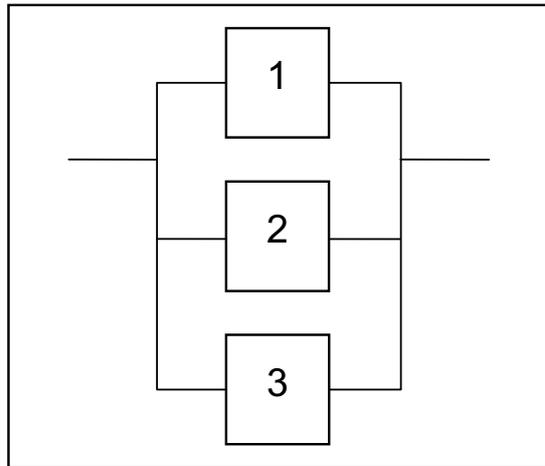


Figura 1.2. Sistema Paralelo de tres componente

Para el sistema paralelo se puede definir la función de estructura de modo similar al sistema serie:

$$\Phi(x) = \max_i \{x_i\} \quad [1.4]$$

Se puede tener las siguientes posibilidades para el sistema paralelo de la Figura 1.2:

$$x_2 = x_3 = 0 \quad y \quad x_1 = 1 \quad \Rightarrow \quad \Phi(x) = 1$$

$$x_1 = x_2 = x_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad \Phi(x) = 0$$

1.1.2.3. Sistema k de n

Un sistema k-de-n es uno en el que el funcionamiento de k cualesquiera de los n componentes del sistema implica el del sistema.

El método habitual para construir el diagrama de bloques para el sistema k-de-n es mostrar un diagrama paralelo con una indicación de que el sistema es k-de-n, como se muestra en la Figura 1.3.

Un ejemplo de un sistema k-de-n es el eje trasero de un gran remolque-tractor, en el que el funcionamiento de tres de las cuatro ruedas es suficiente para asegurar la movilidad. Otro ejemplo, es el hecho de que algunas tablas de memoria electrónica se configuran para que la operación de cualquier conjunto de 126 direcciones de las 128 existentes sea satisfactoria.

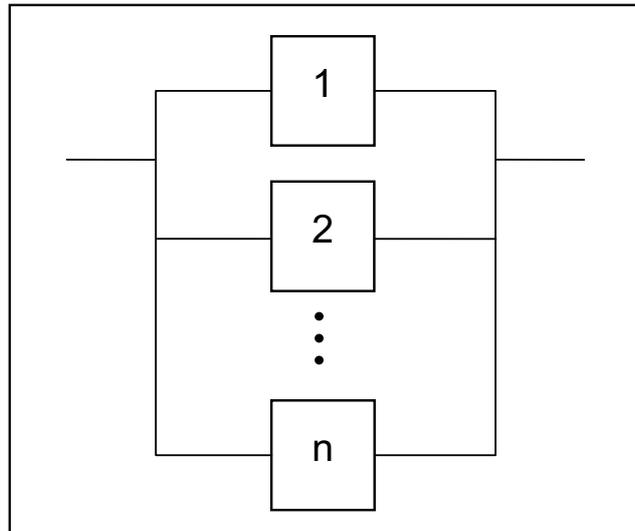


Figura 1.3. Sistema k-de-n

La representación de la función de estructura para un sistema k-de-n no es tan compacta como las correspondientes a sistemas serie y paralelos. Algebraicamente, para un sistema k-de-n:

$$\Phi = \Phi(x) \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i=1}^n x_i \geq k \\ 0 & \text{si } \sum_{i=1}^n x_i < k \end{cases} \quad [1.5]$$

Las posibilidades para un sistema 3-de-4 son:

$$x_2 = x_3 = x_4 = 1 \quad \text{y} \quad x_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad \Phi(x) = 1$$

$$x_2 = x_3 = 0 \quad \text{y} \quad x_1 = x_4 = 1 \quad \Rightarrow \quad \Phi(x) = 0$$

Obsérvese que se puede considerar que un sistema serie es un sistema n-de-n, y que un sistema paralelo es un sistema 1-de-n.

1.1.3. INTRODUCCIÓN MATEMÁTICA DE VARIABLES ALEATORIAS

Los procesos productivos están influenciados por una gran cantidad de factores, muchos de carácter casual, que hacen que el comportamiento de los

indicadores que los describen constituyan variables aleatorias. *Variable aleatoria* es aquella que como resultado de un experimento u observación del comportamiento de una máquina, puede tomar cualquier valor previamente desconocido y que depende de factores fortuitos (Torres, 2005).

Las variables aleatorias pueden ser *discretas* y *continuas*. Las discretas sólo toman valores enteros, por ejemplo, el número de paros no programados ocurridos durante una semana en una planta industrial. Las continuas pueden tomar valores infinitos, por ejemplo, el tiempo hasta el fallo de un elemento de una máquina.

De acuerdo con la información que se posea de la variable aleatoria objeto de estudio, se estará en el campo de las probabilidades o en el de la estadística.

En la Teoría de Probabilidades se parte del conocimiento de las características de la población para inferir el comportamiento de muestras de ella. Es un proceso deductivo, en el cual con el conocimiento de lo general se logra el conocimiento de lo particular (Hines y Montgomery, 1997).

En la Estadística es lo inverso, pues a partir del conocimiento y análisis de los datos de una muestra se infiere acerca de las características de la población. Los métodos estadísticos son para tratar datos obtenidos mediante un muestreo u observaciones reiteradas o susceptibles de repetición (Hines y Montgomery, 1997).

En Mantenimiento lo general es estar en este segundo caso, o sea, frente a fenómenos aleatorios desconocidos que se investigan a partir de datos, mediante muestreo, con el objetivo de establecer las leyes que pueden describirlos (Torres, 2005).

Como el objetivo es describir el comportamiento de una variable aleatoria, se necesita conocer la probabilidad con que la misma toma un valor dado. Se define la *ley de distribución* de la variable como la relación que existe entre los posibles valores de la variable y sus probabilidades correspondientes.

Existen dos formas típicas para expresar una ley de distribución:

1. La función de distribución

2. La densidad de distribución

1.1.3.1. La función de distribución

La función de distribución $F(x)$ se define como la probabilidad de que la variable tome valores menores que un cierto valor dado (Torres, 2005):

$$F(x_1) = P(x < x_1) \quad [1.6]$$

La función de distribución posee las siguientes propiedades:

1. Es una función creciente de su argumento, es decir,

$$\text{Si } x_2 > x_1, \text{ entonces } F(x_2) > F(x_1) \quad [1.7]$$

2. Evaluada para menos infinito toma el valor cero:

$$F(-\infty) = 0 \quad [1.8]$$

3. Evaluada para más infinito toma el valor uno:

$$F(+\infty) = 1 \quad [1.9]$$

4. La probabilidad de que la variable aleatoria tome valores entre dos magnitudes cualquiera equivale a la diferencia de la función de distribución entre dichos puntos:

$$P(x_i < x < x_i + \Delta x) = F(x_i + \Delta x) - F(x_i) \quad [1.10]$$

La función de distribución se expresa gráficamente como se muestra en la Figura 1.4.

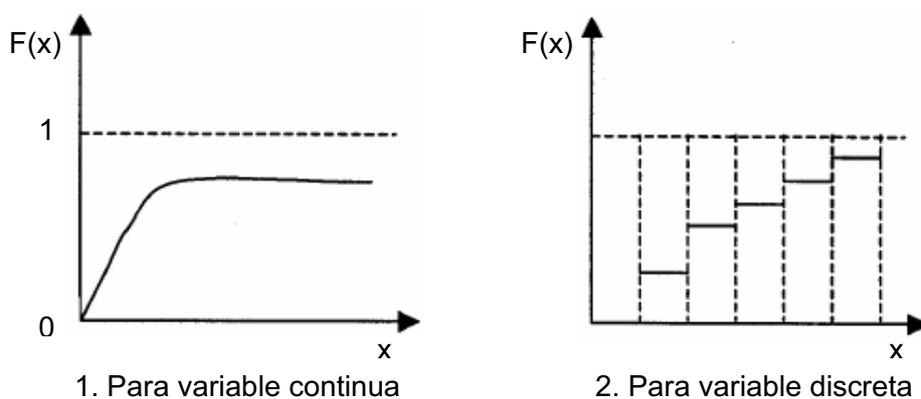


Figura 1.4. Función de distribución

1.1.3.2. La función densidad de distribución

La función densidad de distribución $f(x)$ se define como la derivada de la función de distribución respecto a la variable aleatoria (Torres, 2005; Hines y Montgomery, 1997).

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = \frac{dF(x)}{dx} \quad [1.11]$$

$F(x)$ = representa un área

$f(x)$ = representa un punto

La función densidad de distribución posee las siguientes propiedades:

1. La probabilidad de que la variable tome valores entre dos magnitudes cualesquiera es su integral entre dichas magnitudes:

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad [1.12]$$

2. Su integral entre menos infinito y más infinito es igual a la unidad:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad [1.13]$$

3. Su integral desde menos infinito hasta cierta magnitud de la variable equivale a la función de distribución evaluada en ese valor de la variable:

$$\int_{-\infty}^{x_1} f(x) dx = P(x < x_1) = F(x_1) \quad [1.14]$$

4. Su integral desde cierto valor de la variable hasta más infinito equivale a la función complementaria de la función de distribución:

$$\int_{x_1}^{+\infty} f(x) dx = P(x > x_1) = 1 - F(x_1) = R(x_1) \quad [1.15]$$

La expresión gráfica de la función de densidad de distribución se presenta en la Figura 1.5, en la cual se representan sus diferentes propiedades como áreas debajo de las curvas.

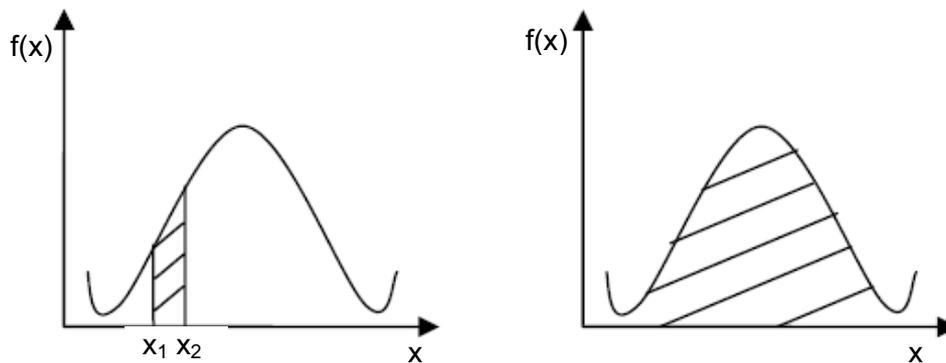


Figura 1.5. Función de densidad de distribución

De la ecuación 1.15 se puede concluir sobre una de las expresiones más sencillas y más importantes de la Teoría de la Confiabilidad:

$$F(x) + R(x) = 1 \quad [1.16]$$

Si la variable aleatoria “x” fuese el tiempo de trabajo útil hasta el fallo, entonces la función de distribución representa la probabilidad de fallo del equipo o máquina hasta cierto tiempo dado. La función complementaria expresará por tanto la probabilidad de trabajo sin fallo hasta ese mismo instante del tiempo. Ambas funciones en cualquier instante suman lógicamente la unidad.

1.1.3.3. Características numéricas de las variables aleatorias

Existen ciertos parámetros conocidos como estadígrafos, que caracterizan la forma de distribución de la variable aleatoria.

Uno de los más importantes a utilizar en la Teoría de la Confiabilidad es *La esperanza matemática o valor medio*, que caracteriza la posición de la variable aleatoria y es una magnitud alrededor de la cual se agrupan todos los valores posibles de la variable (Torres, 2005).

Para variable discreta, la esperanza matemática está dada por:

$$E(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i P(x_i) \quad [1.17]$$

Donde:

$$E(x) = \sum_{i=1}^n x_i F(x) \quad [1.18]$$

n = cantidad de valores estudiados u observados

x_i = diferentes valores que puede tomar la variable

$P(x_i)$ = probabilidad de que la variable tome cierto valor

Para variable continua, la expresión está dada por:

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx \quad [1.19]$$

1.1.4. CONFIABILIDAD E INFIABILIDAD

Para crear un modelo matemático para la probabilidad de fallo, se puede iniciar considerando el funcionamiento de un determinado elemento en el medio para él especificado; se define ahora la variable aleatoria como el tiempo durante el cual el elemento funciona satisfactoriamente antes de que se produzca un fallo. La probabilidad de que el elemento proporcione unos resultados satisfactorios en el instante t se puede definir como Confiabilidad, la cual es designada como $R(t)$ por la mayoría de autores que tratan el tema.

La **Confiabilidad $R(t)$** está relacionada con la función inversa llamada **Infiabilidad $F(t)$** que tiene una probabilidad opuesta, o sea la probabilidad de que ocurra un fallo antes del instante t ; Cumpliéndose que:

$$F(t) = 1 - R(t) \quad [1.20]$$

La Confiabilidad posee las siguientes **características**, mismas que se desarrollan a continuación (Torres, 2005; Nachlas, 1995).

1.1.4.1. Función de repartición

Como un dispositivo nuevo puesto en marcha sufrirá inevitablemente una avería en el instante T , desconocido a priori, se tendrá:

$$F(t_i) = \Pr (T < t_i), \text{ donde:} \quad [1.21]$$

T es una variable aleatoria de la función de repartición $F(t)$

$F(t_i)$ es la probabilidad de que el dispositivo esté averiado en el instante t_i

$R(t_i)$ es la probabilidad de buen funcionamiento en el instante t_i (complemento), por tanto:

$$R(t_i) = \Pr(T > t_i) \quad [1.22]$$

Entonces se tendrá las probabilidades complementarias, como ya se mencionó anteriormente:

$$F(t) + R(t) = 1$$

Su función de densidad será:

$$\int_0^{t_i} f(t).dt + \int_{t_i}^{\infty} f(t).dt = 1 \quad [1.23]$$

La representación gráfica de las funciones de densidad complementarias proporciona un mayor entendimiento de la función de repartición, como se puede observar en la Figura 1.6.

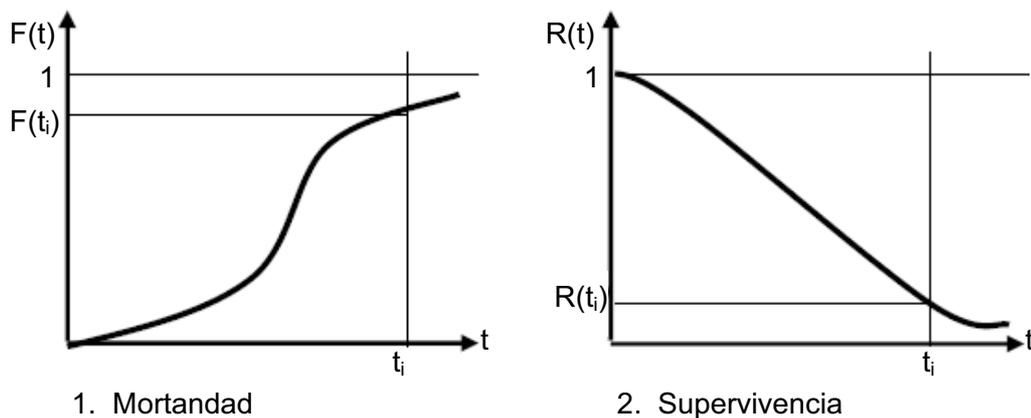


Figura 1.6. Función de repartición

1.1.4.2. Tasa de fallo

La tasa de fallo $\lambda(t)$ es un estimador de la confiabilidad y se expresa frecuentemente en “avería/hora”

$$\lambda(t) = \frac{\text{número de fallos}}{\text{duración}} \quad [1.24]$$

Siendo:

$N(t) =$ el número de dispositivos funcionando en el instante t

$N(t + \Delta t) =$ el número de dispositivos en funcionamiento en el instante $t + \Delta t$, y

$$N(t) - N(t + \Delta t) = \Delta N > 0$$

Donde, ΔN es la cantidad de dispositivos que fallan, entonces:

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \quad [1.25]$$

Las Figuras 1.7 y 1.8 muestran el comportamiento de la tasa de fallos respecto al paso del tiempo, haciendo una distinción entre los dos campos de aplicación más utilizados en la industria en general, el campo mecánico y el campo electrónico; la desclasificación hace referencia a la salida de servicio del elemento o máquina sujeto al análisis (Wear out).

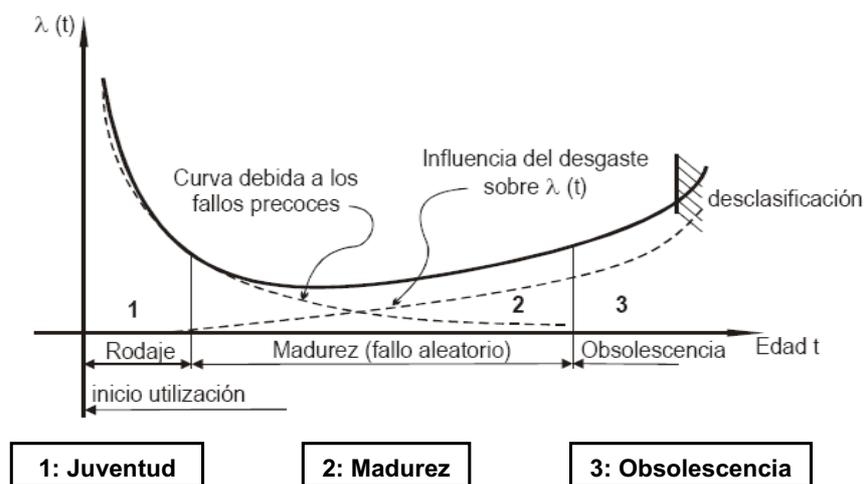


Figura 1.7. La tasa de fallos, Dominio Mecánico

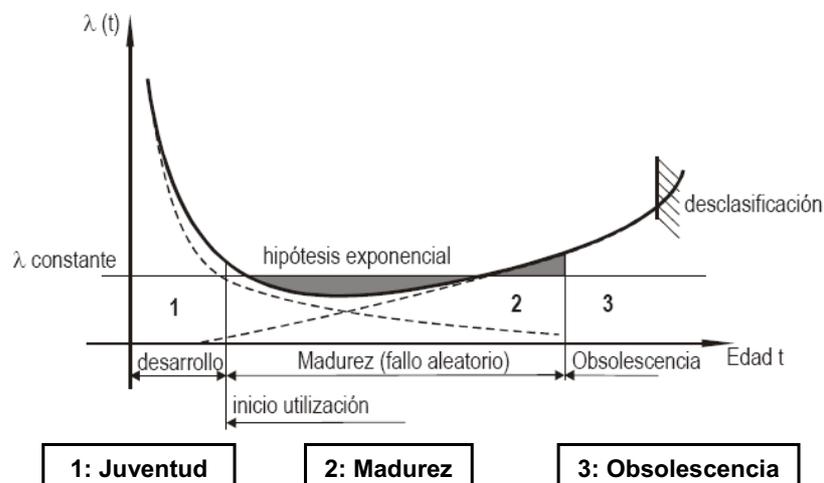


Figura 1.8. La tasa de fallos, Dominio Electrónico

Se constata, como en el caso de numerosas aplicaciones, que la tasa de mortalidad disminuye en el primer período, se estabiliza en un segundo período y crece regularmente en el último período.

En la vida del equipo, las fallas ocurridas en el primer período tienden a ser relativamente altas, como resultado de errores de fabricación detectados por el control de inspección. Esta tasa de mortalidad, relativamente alta, se denomina entonces *tasa de mortalidad infantil*. La tasa de mortalidad infantil es normalmente decreciente.

El segundo período de la vida de un equipo está caracterizado por una tasa de mortalidad aproximadamente constante. Las unidades sufren desperfectos en este segundo período, como resultado de causas no asignables “aleatorias”; como pueden ser los choques térmicos, maltrato, variabilidad de corriente eléctrica, etc.

El tercer período está caracterizado por una tasa de mortalidad creciente como resultado de los problemas de desgaste. Esto da lugar a una curva con forma de “bañera”, la cual se analizará más adelante.

En los tres períodos tanto las “causas aleatorias” como los “defectos de fabricación” o los “problemas de desgaste” tienen incidencia sobre las fallas, pero la incidencia de los unos y de los otros es diferente en los tres períodos mencionados.

Una característica de interés es la “esperanza de vida”, o tiempo medio de funcionamiento hasta la primera falla MTBF (mean time between failure) cuando se trata de unidades reparables, o del MTTF (mean time to failure) cuando se trata de unidades no reparables. Estas dos características serán, más adelante, objeto de un estudio más detallado.

1.1.4.3. Tasa de fallos instantánea

Si Δt tiende a cero, el estimador tiende a un límite que es la **tasa de fallo instantánea**:

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \quad \Delta t \rightarrow 0 \quad \text{Entonces: } \lambda(t) dt = -\frac{dN}{N(t)} \quad [1.26]$$

Considerando esta última expresión se puede llegar a las siguientes deducciones:

- a. **Confiabilidad:** integrando ambos miembros entre 0 y t, se tiene:

$$-\int_0^t \lambda(t).dt = \ln.N(t) + K$$

$$N(t) = K.e^{-\int_0^t \lambda(t).dt} \quad [1.27]$$

Para t=0, N(t) es N₀, de donde K= N₀, siendo

N₀ = Número inicial de componentes en funcionamiento, entonces se tendrá:

$$N(t) = N_0.e^{-\int_0^t \lambda(t).dt} \quad \frac{N(t)}{N_0} = e^{-\int_0^t \lambda(t).dt}$$

De donde,

$$\boxed{R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t).dt}} \quad [1.28]$$

Esta relación es fundamental, porque cualquiera sea la ley de confiabilidad, permite un trazado experimental de la misma en función del tiempo, si se conoce la evolución de la tasa de fallos.

- b. **MTBF:** la duración media entre dos fallos corresponde a la esperanza matemática de la variable aleatoria T, su expresión numérica es:

$$MTBF = E(T) = \int_0^{\infty} t.f(t).dt = \int_0^{\infty} R(t).dt \quad [1.29]$$

- c. **Estimadores de confiabilidad:** cuando el tamaño de la muestra es grande (N > 50 componentes), es posible estimar R por:

$$\blacksquare \quad R(t) = \frac{N(t)}{N_0} = \frac{\text{número de supervivientes en el instante } t}{\text{número inicial}} \quad [1.30]$$

- Por la densidad de probabilidad: $f(t) = \frac{n_i}{N_0}$ [1.31]

- Por la MTBF empírica: $MTBF = \sum_1^{\infty} t \cdot f(t)$ [1.32]

d. **Duración de una misión:** la fórmula para el cálculo de la probabilidad de una misión – denominándose así a los diferentes períodos o etapas que presenta un dispositivo durante su vida – de duración Δt después de un tiempo T de buen funcionamiento se expresa como:

$$R(\Delta t/T) = \frac{R(T + \Delta t)}{R(t)} \quad [1.33]$$

1.1.4.4. Función de densidad de probabilidad de fallos

La función de densidad de probabilidad de fallos es la probabilidad de que un dispositivo cualquiera tenga un fallo entre los instantes “t” y “t + Δt ”.

Matemáticamente tiene la siguiente expresión:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad [1.34]$$

1.1.4.5. Relación entre f(t), $\lambda(t)$ y R(t)

En la Ingeniería de la Confiabilidad se cumple que la probabilidad de producirse un fallo o avería en un elemento entre “t” y “t + Δt ”, es decir f(t), es igual a la probabilidad de que funcione hasta el instante t (Confiabilidad) por la probabilidad de que falle entre “t” y “t + Δt ”; matemáticamente será:

$$f(t)dt = R(t) \cdot \lambda(t)dt \quad [1.35]$$

En la Figura 1.9 se puede ver la representación gráfica de los parámetros expuestos para un caso general.

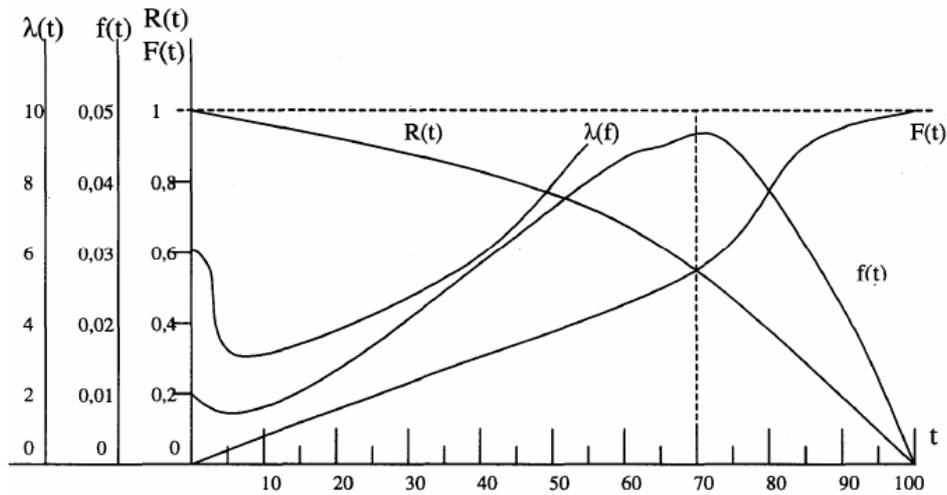


Figura 1.9. Representación gráfica de los parámetros de confiabilidad

(Torres, 2005)

1.1.4.6. La curva Davies o de la bañera

Dado que la **tasa de fallos** varía respecto al tiempo, su representación típica tiene forma de bañera, como se puede observar en la Figura 1.10, debido a que la vida de los dispositivos tiene un comportamiento que viene reflejado por tres etapas diferenciadas, a saber:

- Fallas iniciales (La *tasa de fallos* decrece)
- Fallas aleatorias (La *tasa de fallos* permanece constante)
- Fallas de desgaste (La *tasa de fallos* aumenta)

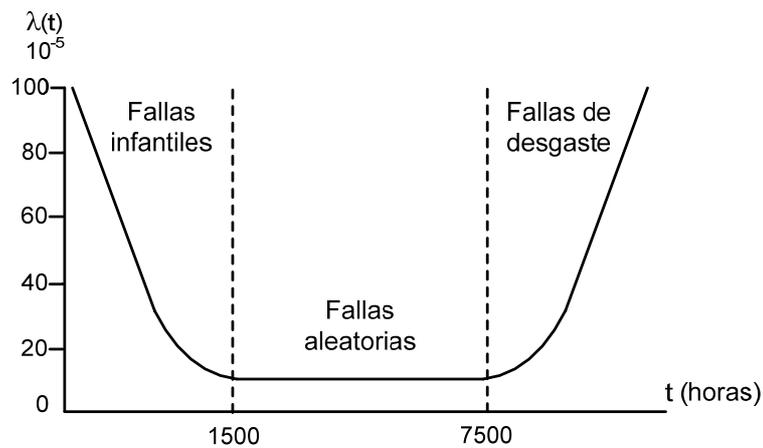


Figura 1.10. Curva típica de evolución de la “tasa de fallos”

Como ya se analizó en el ítem 1.1.4.2; la primera etapa, de fallos iniciales o infantiles, corresponde generalmente a la existencia de dispositivos defectuosos o instalados indebidamente, con una tasa de fallos superior a la normal. Esta tasa de fallos elevada va disminuyendo con el tiempo hasta alcanzar un valor casi constante.

La segunda etapa, de fallos normales o fallos aleatorios, es debida principalmente a operaciones con sollicitaciones superiores a las proyectadas y se presentan de forma aleatoria e inesperada. El comportamiento de la tasa es constante durante esta etapa y los fallos son debido a las propias condiciones normales de trabajo de los componentes o dispositivos, o debido a sollicitaciones temporales superiores a las normales.

La tercera etapa, de fallos de desgaste, es debida a la superación de la vida prevista del componente, cuando empiezan a aparecer fallos de degradación como consecuencia del desgaste. Se caracteriza por un aumento rápido de la tasa de fallos.

1.1.5. TIPOS DE ENSAYOS EN CONFIABILIDAD

Existen varias situaciones características de ensayos en confiabilidad, a saber (Torres, 2005):

1.1.5.1. Datos completos o datos no censurados

En este caso todas las unidades son ensayadas hasta su primera falla.

1.1.5.2. Datos censurados

Existen dos tipos de datos censurados:

1.1.5.2.1. Tipo I:

Los ensayos son detenidos luego de un tiempo prefijado T (independientemente del número de unidades falladas). Se denomina habitualmente “censura por tiempo” (time censoring).

1.1.5.2.2. Tipo II:

Los ensayos son detenidos tras la ocurrencia de la r -ésima falla (independientemente del tiempo transcurrido). Se denomina habitualmente “censura por número de fallas” (failure censoring), cuando existe un único punto de censura, se dice que hay censura simple.

Se dice que hay censura múltiple cuando existen múltiples puntos de censura. Por ejemplo, cuando 5 unidades ensayadas son sacadas de los ensayos luego de 200 horas, y otras 8 son sacadas luego de 400 horas de funcionamiento.

La censura puede ser “por la derecha”, en esos casos, pueden faltar datos sobre el tiempo de funcionamiento hasta la primera falla de algunas unidades ensayadas (sólo se sabe que su tiempo de funcionamiento es superior a un tiempo t conocido).

Los datos “son censurados por la izquierda” cuando sólo se sabe que el tiempo de funcionamiento es inferior a un tiempo conocido.

1.1.6. DISTRIBUCIONES DE FALLO

Una distribución obtenida en forma experimental nos permite estimar la distribución que caracteriza el conjunto mucho más vasto de los dispositivos fabricados en condiciones similares. A continuación se hace referencia a las distribuciones que se encuentran más frecuentemente en el terreno de la confiabilidad y que caracterizan estos “conjuntos mucho más extensos”, es decir poblaciones enteras de unidades fabricadas en condiciones similares.

Estas distribuciones típicas son:

- Distribución exponencial
- Distribución de Weibull
- Distribución de Poisson

Además, también suele usarse para determinados casos la distribución normal, la distribución gamma y la distribución binomial.

Todas estas distribuciones permiten modelar, según los casos, la confiabilidad de los equipos en todos los períodos considerados – Weibull – o en

alguno de los tres – Exponencial, Weibull, Poisson – (Torres, 2005; Dhillon, 1999; Smith, 1997).

1.1.6.1. La distribución exponencial

Cuando la tasa de fallos $\lambda(t)$ es constante nos encontramos ante una distribución de fallas de tipo exponencial. Matemáticamente se puede escribir la función densidad de probabilidad de falla como sigue:

$$f(t) = \lambda e^{(-\lambda t)} \quad \text{Cuando } t \geq 0 \quad [1.36]$$

Integrando $f(t)$: $F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad [1.37]$

Reemplazando en la expresión obtenida de la función de repartición:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

La Confiabilidad tendrá la expresión siguiente:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad [1.38]$$

La Confiabilidad $R(t)$ representa en este caso la probabilidad de que el dispositivo, caracterizado por una tasa de fallos constante, no se averíe durante el tiempo de funcionamiento t .

Esta fórmula de confiabilidad se aplica correctamente a todos los dispositivos que han sufrido un rodaje apropiado que permita excluir los fallos infantiles, y que no estén afectados aún por el desgaste.

En este tipo de distribución de tasa de fallos, se puede examinar las siguientes características:

1.1.6.1.1. Tiempo medio hasta un fallo MTTF

La calidad de funcionamiento de un cierto elemento vendrá dada generalmente por el tiempo que se espera que dicho elemento funcione de manera satisfactoria. Estadísticamente se puede obtener una expectativa de éste tiempo hasta que se produzca un fallo, que se llama tiempo medio hasta un fallo MTTF (Mean Time To Failure). Alternativamente, en sistemas que son reparados continuamente después que se produzcan fallos y continúan funcionando, la expectativa se llama tiempo medio entre fallos MTBF (Mean Time Between

Failure), en cualquiera de los casos el “tiempo” puede ser tiempo real o tiempo de operación.

Dado que la densidad de fallos es $f(t)$, el tiempo T que se espera que transcurra hasta un fallo viene dado por:

$$E(t) = MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} \lambda t \cdot e^{-\lambda t} \cdot dt \quad \text{De donde:} \quad [1.39]$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad [1.40]$$

De donde se puede observar que el MTTF y la tasa de fallos son recíprocos.

1.1.6.1.2. Tiempo medio entre fallos MTBF

Se demuestra que para la distribución exponencial el MTBF es igual a la inversa de la tasa de fallos y por lo tanto igual al MTTF, es decir:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = MTTF = m \quad \text{Donde:} \quad [1.41]$$

m = probabilidad de supervivencia o esperanza de vida.

Al igual que λ , el parámetro m describe completamente la confiabilidad de un dispositivo sujeto a fallos de tipo aleatorio, esto es, la confiabilidad exponencial. La función de confiabilidad, llamada también “probabilidad de supervivencia” se puede escribir por tanto:

$$R(t) = e^{-\frac{t}{m}} \quad [1.42]$$

De la gráfica de la función “probabilidad de supervivencia” se obtiene la “curva de supervivencia”.

1.1.6.1.3. Curva de supervivencia

Al graficar la función “Probabilidad de supervivencia”, con los valores de $R(t)$ en ordenadas y los valores correspondientes de t en abscisas, se obtiene la “**curva de supervivencia**”, representada en la Figura 1.11.

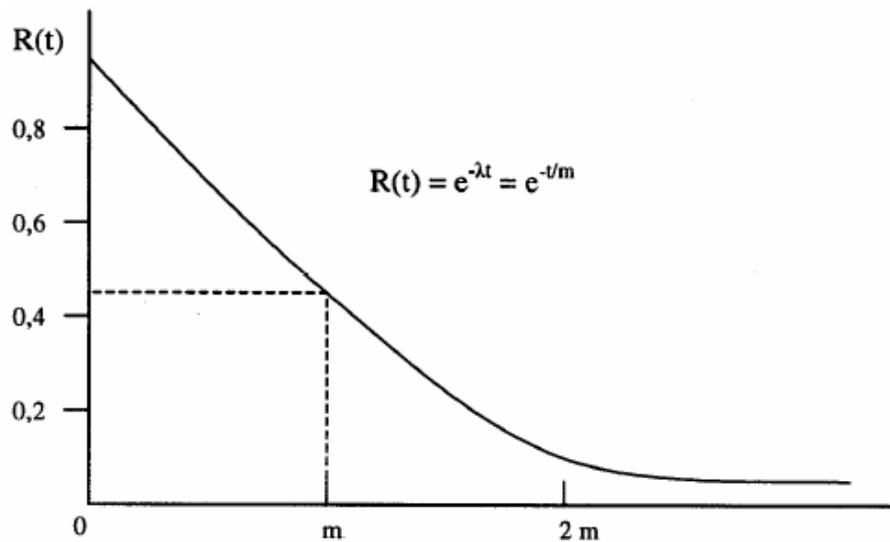


Figura 1.11. Curva de supervivencia

La primera hipótesis se representa gráficamente por la condición: $R(t)=1$, para $t=0$; y, la segunda está contenida en la condición fundamental $\lambda=\text{constante}$.

Una interpretación bastante utilizada del MTBF es su asimilación al tiempo asignado a la misión T_m , a partir del hecho que se cumplirá:

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

Al identificar el tiempo medio entre fallos con la duración de la misión se deduce que la fiabilidad de la misión es:

$$R(t) = e^{-1} = 0,368 \text{ (36,8\%)}$$

Es decir, el dispositivo tendrá una probabilidad de sobrevivir del 36,8%. En la práctica esto significa que poniendo en funcionamiento 100 dispositivos del mismo tipo, cuando hayan pasado un número de horas $t = m = \text{MTBF}$ funcionarán aproximadamente 37, habiendo fallado los 63 restantes.

Para el caso de $t = m/10$, la curva señala una confiabilidad $R = 0,905$ (90,5%) y para el caso de $t = m/100$, la confiabilidad es $R = 0,99$ (99%).

1.1.6.1.4. Vida útil

Se llama “vida útil” al período de vida de un dispositivo durante el cual es válida la fórmula indicada de la confiabilidad. Su duración varía de un dispositivo a otro, es importante que el tiempo t que utilicemos en la fórmula no supere la vida útil del aparato.

Por ejemplo, si la vida útil de un componente es de 1000 horas, su confiabilidad puede preverse en base a la fórmula indicada para un intervalo de tiempo cualquiera comprendido en las primeras 1000 horas de vida del componente. A partir de ese momento la fórmula exponencial no es aplicable porque, terminada la vida útil, la tasa de fallos del dispositivo no es constante y empieza a crecer significativamente.

Durante la vida útil la confiabilidad es aproximadamente la misma para períodos de tiempo de funcionamiento iguales. Así la confiabilidad es la misma para las primeras 10 horas que para las 10 últimas, esto es la confiabilidad es la misma para el período comprendido entre la hora 0 y la hora 10 que entre la hora 990 y la hora 1000.

En conclusión, la confiabilidad de un dispositivo cualquiera es constante para períodos de tiempo de utilización iguales si:

- Se eliminan los fallos infantiles con un rodaje apropiado
- El dispositivo ha sobrevivido al funcionamiento durante los períodos anteriores al considerado
- No se supera el límite de vida útil más allá del cual la Confiabilidad disminuye con mayor o menor rapidez.

1.1.6.2. El modelo de Weibull

El modelo probabilístico de Weibull es muy flexible, pues tiene tres parámetros que permiten “ajustar” correctamente toda clase de resultados experimentales y operacionales. Contrariamente al modelo exponencial, la ley de Weibull cubre los casos en que la tasa de fallo λ es variable y permite por tanto ajustarse a los períodos de “juventud” y a las diferentes formas de “envejecimiento”; recordemos la curva “bañera” de $\lambda(t)$, analizada anteriormente.

Para su utilización se precisan los resultados de ensayo de muestras o la toma de datos de funcionamiento TBF (intervalo entre dos fechas de averías – Time Between Failures).

Estos resultados permiten estimar la función de repartición $F(t)$ que corresponde a cada instante t .

La determinación de los tres parámetros permite, utilizando tablas, evaluar el MTBF y la desviación típica. Por otra parte, el conocimiento del parámetro de forma β es una herramienta útil de diagnóstico del tipo de fallo, cuando el equipo en estudio es una caja negra. Para evaluar el MTBF y la desviación típica, también se puede utilizar algún software de los existentes en el mercado.

1.1.6.2.1. Gráficos $f(t)$ y $\lambda(t)$

La Figura 1.12 muestra el polimorfismo de la ley de Weibull bajo influencia del parámetro de forma β .

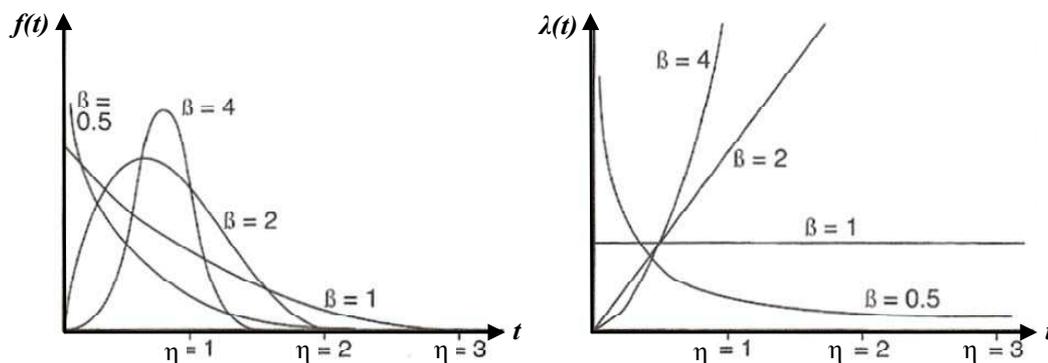


Figura 1.12. Gráfica $f(t)$ y gráfica $\lambda(t)$ para el modelo de Weibull

(Moubray, 2004)

1.1.6.2.2. Expresiones matemáticas

Sea la variable aleatoria continua t , distribuida de acuerdo con la ley de Weibull, entonces se tendrá:

1.1.6.2.2.1. Densidad de probabilidad $f(t)$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^\beta} \quad \text{Siendo } t \geq \gamma \quad [1.43]$$

Donde:

β : es el parámetro de forma, $\beta > 0$

η : es el parámetro de escala, $\eta > 0$

γ : es el parámetro de posición, $-\infty < \gamma < +\infty$

1.1.6.2.2.2. Función de repartición $F(t)$

$$F(t) = 1 - e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta} \quad [1.44]$$

La confiabilidad correspondiente es por lo tanto $R(t) = 1 - F(t)$:

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta} \quad [1.45]$$

Para $\gamma = 0$ y $\beta = 1$, se vuelve a encontrar la distribución exponencial, caso particular de la ley de Weibull. En este caso tendremos:

$$\lambda = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF} \quad [1.46]$$

1.1.6.2.2.3. Tasa instantánea de fallo $\lambda(t)$

$$\lambda = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad [1.47]$$

$$\lambda = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1} \quad [1.48]$$

Siendo: $t \geq \gamma$; $\beta > 0$; $\eta > 0$

De donde se puede obtener las siguientes observaciones:

- Si $\beta < 1$, $\lambda(t)$ decrece: período de juventud (rodaje, desarrollo).
- Si $\beta = 1$, $\lambda(t)$ es constante: independencia del proceso y del tiempo.
- Si $\beta > 1$, $\lambda(t)$ crece: fase de obsolescencia que se puede analizar detalladamente para orientar el diagnóstico.
- $1,5 < \beta < 2,5$ fenómeno de fatiga.

$3 < \beta < 4$ fenómeno de desgaste, de corrosión (iniciado en el tiempo $t = \gamma$), de sobrepasar un umbral (campo de deformación plástica).

$\beta = 3,5$ $f(t)$ es simétrica, la distribución es “normal”.

Mientras que el material electrónico demuestra una larga fase de vida a λ constante; el material electromecánico, a causa de los fenómenos de desgaste, no muestra aplanamientos en la “curva de la bañera” y debe, por tanto, ser modelado por la ley de Weibull.

1.1.6.2.2.4. Duración de vida t asociada a un nivel de confiabilidad $R(t)$

Como ya se puntualizó anteriormente es posible asociar a cada instante t una probabilidad $R(t)$. Recíprocamente a menudo es interesante si se parte de un nivel de confiabilidad $R(t)$, para hallar el instante t correspondiente. En particular, se llama L_{10} a la duración de vida “nominal” asociada al nivel $R(L_{10}) = 0,90$ (notación generalizada en las duraciones de vida nominales de los rodamientos).

Desarrollo:

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta}$$

Si se toma el logaritmo neperiano en los dos miembros se obtiene:

$$\text{Ln}R(t) = -\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta \quad \text{Ln}\frac{1}{R(t)} = \left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta$$

$$\text{Ln}\left[\frac{1}{R(t)}\right]^{1/\beta} = \frac{t-\gamma}{\eta}$$

De donde:

$$t = \gamma + \eta \cdot \text{Ln}\left[\frac{1}{R(t)}\right]^{1/\beta} \quad [1.49]$$

Y en particular, para el nivel $R(t) = 0,90$

$$L_{10} = \gamma + \eta \cdot \text{Ln}\left[\frac{1}{0,9}\right]^{1/\beta}$$

$$L_{10} = \gamma + \eta \cdot \text{Ln}(0,105)^{1/\beta}$$

La duración de la vida se puede estimar después de haber determinado los tres parámetros de la Ley de Weibull.

1.1.6.3. Distribución de Poisson

La distribución de Poisson es otra ley de distribución para variables discretas. Su función de densidad tiene la expresión siguiente:

$$f(t) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^t}{t!} \quad \text{Para } t = 0, 1, 2, \dots, n \quad [1.50]$$

Donde “n” es la cantidad total de fallos o valores de la variable estudiada.

La función de distribución será:

$$F(t) = \sum_{i=0}^n \frac{e^{-\lambda} \lambda^i}{i!} \quad [1.51]$$

1.1.7. PROCESOS DE DESGASTE Y FALLO

Una vez analizados los atributos de probabilidad y tiempo de la definición de Confiabilidad, es necesario estudiar el cuarto y último integrante de dicha definición, el entorno, para lo cual se examinará las relaciones entre el entorno de funcionamiento y la Confiabilidad.

Toda instalación destinada a producir un bien o un servicio, debe ser mantenida en condiciones que le permitan seguir en funcionamiento, logrando un producto de determinada calidad, y a un costo lo más bajo posible. Quienes se dedican al mantenimiento de cualquier tipo de instalación, deben ofrecer la reparación de los desperfectos que ocurran y las modificaciones necesarias para que estos no aparezcan.

Estos desperfectos o deterioros en las instalaciones, máquinas o equipos que no permiten su normal funcionamiento se definen como “fallas”.

Por tanto, se podría denominar como falla, cualquier cambio en el tamaño, la forma o las propiedades de una estructura, sistema, equipo o dispositivo, que lo haga incapaz de realizar la función para la que fue diseñada. Un fallo también se puede definir como el cambio en un equipo o sistema desde una condición de

trabajo satisfactoria a una condición que está por debajo de un estándar aceptable.

La experiencia demuestra que no existen instalaciones, máquinas o equipos que estén libres de fallas a lo largo de su vida útil, y que con una adecuada gestión de mantenimiento es posible reducir a un mínimo los perjuicios que ocasiona algún desperfecto.

En la industria se suele considerar como “avería” a cualquier anomalía que impida mantener los niveles de producción. Pero el concepto es aún más amplio y debe tener en cuenta la falta de calidad del producto, la falta de seguridad, el mal aprovechamiento de la energía disponible y la contaminación ambiental.

De cualquier manera estos fallos en la maquinaria o el producto pueden tener efectos de largo alcance en el funcionamiento y beneficios de una empresa; en instalaciones complejas y altamente mecanizadas, un proceso fuera de tolerancia o una avería en una máquina puede dar como resultado que los empleados y las instalaciones queden inactivos, pérdida de clientes y de credibilidad, y que los beneficios se conviertan en pérdidas.

Otro de los conceptos que es necesario explorar es el “desgaste”, el cual se define como el cambio acumulativo e indeseable en el tamaño, forma o propiedades de una estructura, sistema, máquina, equipo o dispositivo que conduce a una falla.

Los procesos de desgaste y falla son muy variados, por ejemplo se pueden enumerar como fallas mecánicas las siguientes: fallas por deformación elástica inducida por fuerza, temperatura, o por ambas causas; falla por fluencia; falla por compenetración o brinelado; falla por ruptura en condición dúctil; falla por fractura o ruptura en condición frágil; falla por fatiga; falla por corrosión: ataque químico directo, corrosión galvánica, corrosión en resquicios, corrosión por picadura, corrosión ínter granular, decapado selectivo, corrosión por erosión, corrosión por cavitación, daño por hidrógeno y corrosión biológica; desgaste: desgaste adhesivo, abrasivo, corrosivo, por fatiga superficial, por deformación y, de impacto; falla por impacto; falla de retrete; falla por escurrimiento o flujo plástico; falla por relajación térmica, etc. (Torres, 2005; Nachlas, 1995; Knezevic, 1996a).

1.1.7.1. Origen de las fallas

En cuanto al origen de las fallas, algunos autores coinciden en citar las siguientes causas (Torres, 2005):

1.1.7.1.1. Mal diseño o error de cálculo en las máquinas o equipos:

Se dan casos en que el propio fabricante, por desconocer las condiciones en que trabajarán, realiza un diseño no adecuado de estas máquinas o equipos. Se puede estimar éste error en un 12% del total de las fallas. Este tipo de situación es muy difícil de revertir, y es probable que se tenga que asumir un alto índice de desperfectos.

1.1.7.1.2. Defectos de fabricación de las instalaciones, máquinas o equipos:

Si en la fabricación se descuida el control de la calidad de los materiales, o de los procesos de fabricación de las piezas componentes, las máquinas e instalaciones pueden poseer defectos que se subsanan reemplazando la pieza defectuosa. Este tipo de error se puede encontrar en un 10,45% del total de las fallas.

1.1.7.1.3. Mal uso de las instalaciones, máquinas o equipos:

Es la más frecuente causa de origen de las fallas, y se producen por falta de conocimiento del modo de operarlas, o por usarlas para realizar trabajos para los cuales no fueron diseñadas. Alcanzan el 40% del total de las fallas.

1.1.7.1.4. Desgaste natural o envejecimiento por el uso:

Debido al paso del tiempo y al trabajo cotidiano de las instalaciones, máquinas o equipos estos alcanzan niveles de desgaste, de abrasión, de corrosión, etc. A este tipo de falla se la estima en el 10,45%.

1.1.7.1.5. Fenómenos naturales y otras causas:

Las condiciones atmosféricas pueden influir en el normal funcionamiento de las instalaciones, máquinas o equipos, y junto con otro tipo de fallas pueden producir roturas y paradas ocasionales de la producción. Se las supone en un 27% de las fallas totales.

1.1.7.2. Modelos de fallos

Una parte sustancial del esfuerzo científico y de ingeniería que ha constituido la evolución de la disciplina de la Confiabilidad se ha centrado en el estudio y en la realización de modelos de los procesos de desgaste y fallo de componentes.

Nuevas investigaciones han cambiado y siguen cambiando las creencias más básicas acerca del mantenimiento. En particular, se hace aparente ahora, que hay una menor conexión entre el tiempo que lleva una máquina funcionando y sus posibilidades de fallo, como se puede observar en la Figura 1.13.

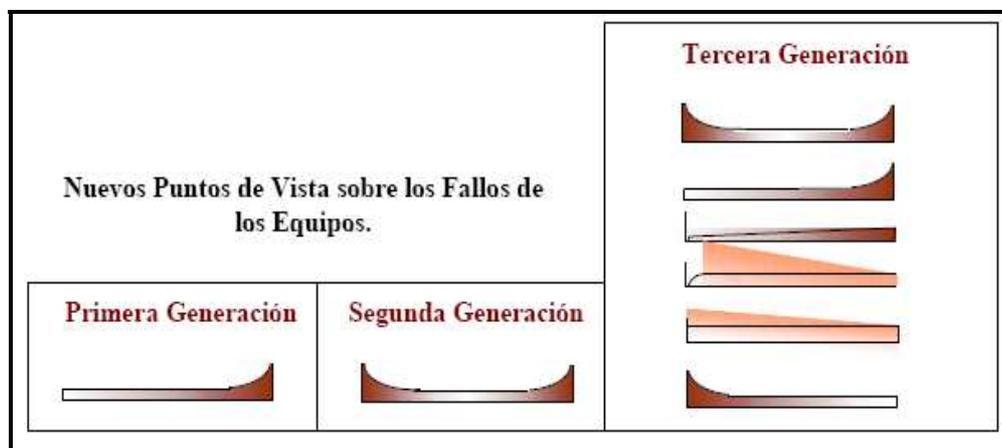


Figura 1.13. Puntos de vista de los fallos de equipos

(Amendola, 2002)

Como se puede observar, el punto de vista acerca de los fallos en un principio, durante la denominada **Primera Generación**, era simplemente asociado a que cuando los elementos físicos envejecen, tienen más posibilidades de fallo; mientras que un conocimiento creciente acerca del desgaste por el uso durante la **Segunda Generación** llevó a la creencia general en la “Curva de la Bañera”. Sin embargo, la investigación hecha por la **Tercera Generación** ha revelado que en la práctica actual no solo ocurre un modelo de fallo sino seis diferentes, como se puede observar más detalladamente en el Anexo I, en el cual se puede apreciar que:

El modelo A, con una incidencia menor al 5%, es la conocida “curva de la bañera”; comienza con una alta incidencia de fallo (conocida como *mortalidad*

infantil o desgaste de rodaje), seguida por una frecuencia de fallo que aumenta gradualmente o que es constante y, luego por una zona de desgaste.

El modelo B, con una incidencia menor al 3%, muestra una probabilidad de fallo constante o ligeramente ascendente y, termina en una zona de desgaste igual al modelo A.

El modelo C, con una incidencia menor al 6%, muestra una probabilidad de fallo ligeramente ascendente, pero no hay una edad de desgaste definida que sea identificable.

El modelo D, con una incidencia menor al 8%, muestra una probabilidad de fallo bajo cuando la pieza es nueva o se acaba de comprar, luego un aumento rápido a un nivel constante.

El modelo E, con una incidencia menor al 15%, muestra una probabilidad constante de fallo en todas las edades (fallo aleatorio).

Finalmente, el modelo F, con una incidencia mayor al 65%, comienza con una mortalidad infantil muy alta, que desciende finalmente a una probabilidad de fallo que aumenta muy despacio o que es constante.

Los valores de incidencia asignados a cada modelo, citados anteriormente, son el resultado de estudios realizados en la Aviación Militar y Civil. En general, los modelos de los fallos dependen de la complejidad de los elementos; cuanto más complejos sean, es más fácil que estén de acuerdo con los modelos E y F. El número de veces que ocurren estos modelos en la aviación no es necesariamente el mismo que en la industria, pero no hay duda que mientras más complicados sean los equipos, más veces encontraremos los modelos de fallo E y F.

Al extenderse la aplicación de estos seis modelos de falla a la industria manufacturera, se ha podido determinar que alrededor del 30% de las fallas están de acuerdo con los modelos A y B; y el 70 % de las fallas están de acuerdo con los modelos C, D, E y F. Por esta razón se ha tomado en la actualidad como referencia la distribución exponencial en la que la tasa de fallos es constante (Amendola, 2002; Ministry of Defense-England, 2000; Moubray, 2004).

1.2. ESTUDIO DE MANTENIBILIDAD

1.2.1. EL CONCEPTO DE PERFIL DE FUNCIONABILIDAD

La única característica común entre todos los sistemas creados por el hombre es su capacidad para satisfacer una necesidad, desempeñando una función específica. Consecuentemente, la **funcionalidad** será la característica más importante de cualquiera de estos sistemas y está relacionada con su capacidad inherente para desempeñar una función específica.

Ahora bien, no sólo se espera de un sistema dado que realice una función especificada, sino también que satisfaga unos requisitos especificados, especialmente unas prestaciones especificadas. La mayor parte de las veces, los requisitos de prestaciones están relacionados con el tamaño, volumen, forma, capacidad, caudal, velocidad, aceleración y muchas otras características físicas y operativas. La mayoría son numéricamente cuantificables, pero quedan otros que sólo se pueden describir de forma cualitativa.

Por consiguiente, para definir la “función” de estos sistemas creados por el hombre, se deben reunir los aspectos de funcionalidad, prestaciones y condiciones operativas a fin de obtener una imagen completa del sistema que satisfaga la necesidad. Esto ha sido realizado por Knezevic, introduciendo el concepto de **funcionabilidad** como mecanismo de unión de estos tres aspectos, y definiéndolo como *“la capacidad inherente de un elemento/sistema para desempeñar una función requerida con unas prestaciones especificadas, cuando es usado según se especifica”* (Knezevic, 1993).

De la definición anterior está claro que hay una diferencia significativa entre funcionalidad y funcionabilidad de un sistema en consideración. La **funcionalidad** está relacionada puramente con la función desempeñada, mientras que la **funcionabilidad** toma en consideración el nivel de prestaciones obtenido (Knezevic, 1996a).

A pesar de que un sistema sea “funcional” al comienzo de su vida operativa, todos los usuarios somos completamente conscientes de que, independientemente de la perfección del diseño de un sistema o de la tecnología de su producción o de los materiales usados en su fabricación, durante su

operación se producirán algunos cambios irreversibles. Estos cambios son resultado de procesos de desgaste, como los analizados en los ítems anteriores; a menudo estos procesos se superponen e interactúan los unos con los otros y causan un cambio en el sistema, como resultado del cual cambiarán sus características de actuación. La desviación de esas características respecto a los valores especificados es considerada un fallo del sistema.

El fallo del sistema puede, por consiguiente, ser definido como un suceso cuya realización provoca, o bien la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas, o bien la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos especificados, definición que ya fue analizada en el numeral 1.1.7. Independientemente de las razones de su aparición, un fallo causará la transición del sistema desde su estado satisfactorio a un nuevo estado insatisfactorio, conocido como estado de fallo, SoFa (State of Failure)

Por tanto, desde el punto de vista de la capacidad para satisfacer las “necesidades” de acuerdo con las especificaciones establecidas, todos los sistemas creados por el hombre pueden pertenecer a uno de los dos posibles estados (Knezevic, 1996a):

- Estado de Funcionamiento, SoFu (State of Functioning).
- Estado de Fallo, SoFa (State of Failure).

Los sistemas de ingeniería suelen clasificarse en dos tipos: sistemas no recuperables y sistemas recuperables.

1.2.1.1. Sistemas no recuperables

Un sistema no recuperable es aquel en el que una transición al estado de fallo implica su baja, como por ejemplo cohetes, satélites, baterías, bombillas, fusibles, chips, etc. Estos sistemas son conocidos como no recuperables, simplemente porque es imposible recuperar su capacidad de realizar su función, una vez que ha ocurrido una transición al estado de fallo; su perfil funcional puede ser representado como se muestra en la Figura 1.14.



Figura 1.14. Perfil de funcionabilidad de un sistema de ingeniería no recuperable

1.2.1.2. Sistemas recuperables

Un sistema recuperable es aquel que después de haber fallado se puede recuperar su capacidad de realizar una función especificada. Consecuentemente, el término *recuperabilidad* será utilizado para describir la capacidad de un sistema de ser recuperado tras su fallo.

Para que un sistema recupere la capacidad de realizar una función es necesario realizar unas tareas especificadas, conocidas como tareas de mantenimiento.

Como se muestra en la Figura 1.15, desde el punto de vista de la funcionabilidad, un sistema recuperable fluctúa entre SoFu y SoFa durante su vida operativa hasta su baja.

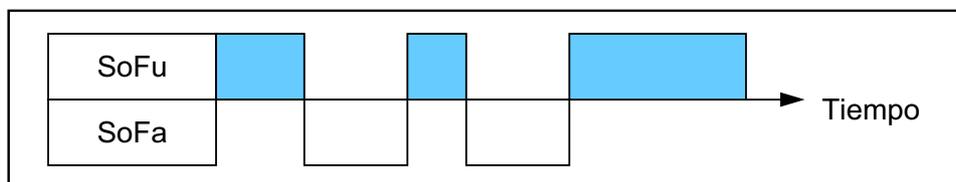


Figura 1.15. Perfil de funcionabilidad de un sistema de ingeniería recuperable

1.2.2. LA IMPORTANCIA DE LA DISPONIBILIDAD

Dado que se espera que un sistema funcione o permanezca en un estado de funcionamiento SoFu, en las últimas décadas los fabricantes han sido sometidos por los usuarios a fuertes presiones, para que suministren información sobre la forma esperada del perfil de funcionabilidad, junto con una lista de todos los recursos necesarios para su consecución.

La disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionabilidad de un elemento. Es una medida extremadamente importante y útil en casos en los que el usuario tiene que tomar decisiones con

respecto a la adquisición de un elemento entre varias posibles alternativas. Por esto, para tomar una decisión objetiva con respecto a la adquisición del nuevo elemento, es necesario utilizar información que abarque todas las características relacionadas. Así, la disponibilidad es una medida que suministra una imagen más completa sobre el perfil de funcionabilidad.

De ahí que, la **disponibilidad** se define como la proporción del tiempo durante la cual un sistema o equipo está en condiciones de ser usado (Knezevic, 1996a; Torres, 2005).

1.2.3. LA MANTENIBILIDAD COMO DETERMINANTE DE LA DISPONIBILIDAD

La mayoría de los usuarios afirman que necesitan la disponibilidad del equipo tanto como la seguridad, porque no se puede tolerar tener un equipo fuera de servicio; hay varios medios con los que los diseñadores pueden lograrlo. Uno es construir las cosas extremadamente confiables y, consecuentemente, costosas. El segundo es suministrar un sistema que, cuando falle, sea fácil de recuperar. Así, si todo está construido muy confiable y todo es fácil de reparar, el fabricante tiene un sistema muy eficaz, que nadie puede permitirse comprar. Consecuentemente, la pregunta es: ¿cuánto se necesita la utilidad del sistema, y cuánto se está dispuesto uno a pagar por ello?

De ahí la importancia de diseñar para la mantenibilidad, como uno de los factores principales del logro de un alto nivel de disponibilidad operativa.

Una de las creencias comunes es que la mantenibilidad es simplemente la capacidad de llegar a un componente para reemplazarlo; sin embargo, eso es sólo un pequeño aspecto. En realidad, la mantenibilidad es una dimensión de la fabricación del sistema y una política de gestión del mantenimiento del sistema, en donde cada característica tiene que ser sopesada frente al costo y a la eficacia operativa del sistema.

En todo caso, actualmente, la mayoría de los usuarios se preocupan en la ventaja competitiva que la mantenibilidad y el mantenimiento pueden proporcionar a una compañía, puesto que una mantenibilidad aumentada implica tiempos de mantenimiento más cortos (Knezevic, 1996a).

1.2.4. LA DEFINICIÓN DE LA MANTENIBILIDAD

El tiempo que dura la tarea de mantenimiento está relacionado directamente con la parte inferior del perfil de funcionabilidad mostrado en la Figura 1.16.



Figura 1.16. Duración incierta del tiempo de recuperación

Históricamente se han ignorado los aspectos de la recuperación, a pesar de que la respuesta depende del diseño; sin embargo, en la actualidad, esta situación está cambiando gradualmente, convirtiendo a este tipo de información en una característica tan deseable como las prestaciones y la confiabilidad.

Esta exigencia de los usuarios impulsó la creación de una nueva disciplina científica que pudiera auxiliar a los diseñadores y fabricantes a proporcionar ese tipo de información; es así que se creó la **Ingeniería de Mantenibilidad**: “una disciplina científica que estudia la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades que debe realizar el usuario para mantener la funcionabilidad de un equipo, y que elabora métodos para su cuantificación, evaluación, predicción y mejora” (Knezevic, 1993).

La importancia de la ingeniería de mantenibilidad está creciendo rápidamente, debido a su considerable contribución a la reducción del costo de mantenimiento de un producto durante su uso.

En la literatura técnica se puede encontrar varias definiciones de la mantenibilidad, una de ellas es la siguiente:

“La mantenibilidad es la característica inherente de un elemento, asociada a su capacidad de ser recuperado para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento necesaria según se especifica” (Knezevic, 1996a).

En la práctica de ingeniería, la definición anterior de mantenibilidad debe ser expresada numéricamente; de esta forma, las características cualitativas deben ser “traducidas” en medidas cuantitativas. De acuerdo con Blanchard (Blanchard, 1986) se puede expresar en términos de factores de tiempo empleado en mantenimiento, frecuencia de mantenimiento y costo de mantenimiento. Estos términos pueden ser presentados como características diferentes; por tanto, la mantenibilidad puede definirse según una combinación de factores como:

1. Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad de que un elemento sea conservado o recuperado en una condición especificada, a lo largo de un período dado del tiempo empleado en el mantenimiento, cuando éste se realiza de acuerdo con los procedimientos y recursos prescritos.
2. Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad de que no se necesitará mantenimiento más de “n” veces en un período dado, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos.
3. Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad de que el costo de mantenimiento de un sistema no supere una cantidad de dinero especificada, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos.

Aunque estas tres maneras de cuantificar la mantenibilidad son teóricamente posibles, el enfoque basado en el tiempo empleado en el mantenimiento es, de lejos, el más usado en la práctica (Knezevic, 1996a).

1.2.5. ENFOQUE DE LA MANTENIBILIDAD BASADO EN EL TIEMPO EMPLEADO

La mantenibilidad puede representarse gráficamente como lo muestra la Figura 1.17, donde T representa el tiempo necesario para la acertada finalización de una tarea especificada de mantenimiento.

La recuperabilidad, aun siendo un valor desconocido, va a ser idéntica para todos los elementos en consideración; por tanto, no hay necesidad de asignarle un valor numérico.

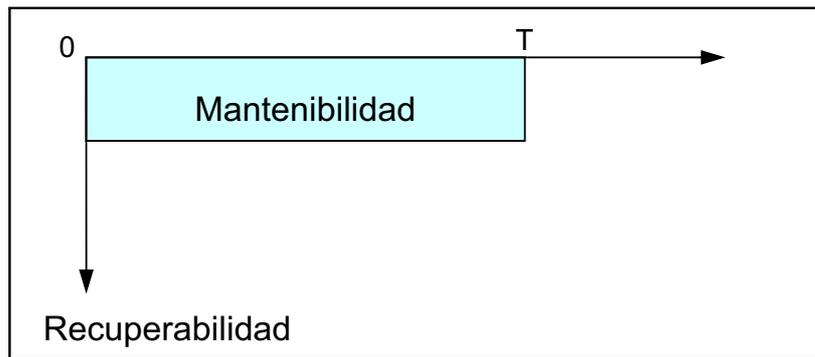


Figura 1.17. Enfoque de la Mantenibilidad basado en el tiempo empleado

El análisis de la figura anterior sugiere que la capacidad de recuperar la funcionalidad mediante la realización de una tarea especificada de mantenimiento, puede expresarse numéricamente por el área indicada. Esto significa que la mantenibilidad es inversamente proporcional al área considerada, es decir, el elemento con mantenibilidad más deseable cubrirá un área más pequeña, y viceversa. Es necesario destacar que el tamaño del área considerada, depende principalmente de las decisiones tomadas durante la fase de diseño.

Así, la mantenibilidad podría ser expresada cuantitativamente, mediante el tiempo T empleado en realizar la tarea de mantenimiento especificada en el elemento que se considera, con los recursos de apoyo especificados.

Pero, ¿cuál será la naturaleza de T ? Como lo que físicamente existen son copias del elemento en consideración, la tarea de mantenimiento existe sólo mediante la ejecución física de las actividades que la componen. Por ello, la respuesta dependerá del tiempo empleado cada vez que se realice dicha tarea para la recuperación del elemento. A pesar del hecho de que cada tarea de mantenimiento se compone de las actividades especificadas, que se realizan en una secuencia especificada, el tiempo empleado en la ejecución de la tarea puede diferir cada vez que es realizada. En la Figura 1.18 se puede observar esta variación en los tiempos de ejecución de una misma tarea.

Si se analiza el tiempo empleado en la recuperación a lo largo de las veces que se realiza una tarea de mantenimiento especificada, puede verse que una de ellas puede ser completada en el instante t_1 , otra en el instante t_2 y, de la misma manera la enésima será ejecutada en el instante t_n .

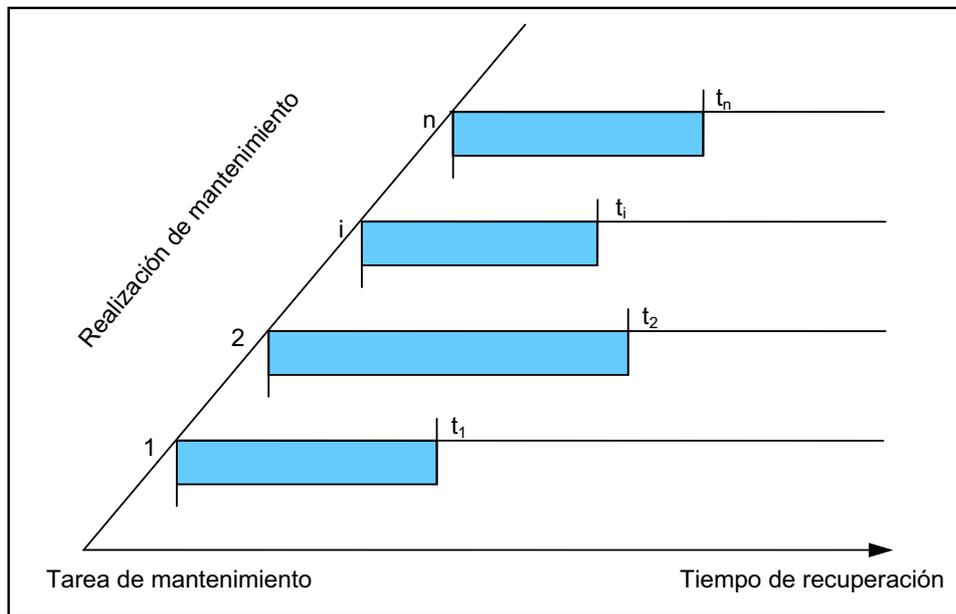


Figura 1.18. Configuración del mantenimiento en varias realizaciones de una tarea de mantenimiento específica

Esta variación en los tiempos de ejecución de una tarea especificada, está sujeta a factores que intervienen durante su realización; siendo los grupos más importantes de estos factores, los siguientes:

1. Factores personales: representan la influencia de la habilidad, motivación, experiencia, actitud, capacidad física, vista, autodisciplina, formación, responsabilidad y otras características similares relacionadas con el personal involucrado.
2. Factores condicionales: representan la influencia del entorno operativo y las consecuencias que ha producido el fallo en la condición física, geometría y forma del elemento en recuperación.
3. Entorno: representa la influencia de factores como temperatura, humedad, ruido, iluminación, vibración, momento del día, época del año, viento, etc., en el personal de mantenimiento durante la operación de recuperación.

Por lo tanto, la relación entre los mencionados factores y el parámetro T podría expresarse por la siguiente ecuación:

$$T = f(\text{factores personales, condicionales y ambientales}) \quad [1.52]$$

Analizando la expresión anterior puede decirse que, como resultado del elevado número de parámetros en cada grupo, por un lado, y de su variabilidad, por otro, es imposible encontrar la regla que describiría de forma determinista esta compleja relación representada por “f”. El único camino posible en el análisis de mantenibilidad es recurrir a la teoría de probabilidades, que ofrece una “herramienta” para la descripción probabilística de la relación definida por la expresión anterior (Knezevic, 1996a; Dhillon, 1999).

Bajo este análisis se tiene la siguiente definición de Mantenibilidad:

“La mantenibilidad, es la probabilidad de que una máquina, equipo o un sistema pueda ser reparado a una condición especificada en un período de tiempo dado, en tanto su mantenimiento sea realizado de acuerdo con ciertas metodologías y recursos determinados con anterioridad” (Torres, 2005).

En conclusión, podría decirse que es imposible dar una respuesta determinista respecto al instante de tiempo operativo en que se produce la transición del SoFa al SoFu, para cualquier ensayo individual de la tarea de mantenimiento en consideración. Sólo es posible asignar una cierta probabilidad de que ocurra en un cierto instante de tiempo de mantenimiento, o de que un determinado porcentaje de ensayos sean o no completados antes de un tiempo determinado.

1.2.5.1. Medidas de la mantenibilidad

Las medidas de mantenibilidad están relacionadas con el tiempo que un elemento pasa en SoFa. De aquí que la característica que define cuantitativamente la relación entre ellas, debe basarse en el correspondiente tiempo empleado.

El objetivo principal del presente análisis es definir las medidas mediante las que puede ser descrita y definida la mantenibilidad, ya que la funcionalidad se expresa numéricamente mediante parámetros conocidos generalmente como prestaciones.

Así, la recuperación de la funcionalidad de un elemento de ingeniería podría ser considerada como un experimento aleatorio, y la transición del sistema al estado de funcionamiento como el suceso elemental que corresponde al resultado de ese experimento. La función que asigna un valor numérico correspondiente t_i a cada suceso elemental del espacio muestral, es una variable aleatoria, que es denominada por la mayoría de autores como “*Tiempo de Recuperación*” (Time To Restore, TTR). Así, la probabilidad de que la variable aleatoria TTR tome el valor t_i , será:

$$p_i = P(TTR = t_i) \quad [1,53]$$

Utilizando los conceptos de probabilidad, analizados anteriormente, la mantenibilidad del sistema o de sus componentes como característica cualitativa, puede ser traducida en una medida cuantitativa (Knezevic, 1996a).

1.2.5.2. Características de la mantenibilidad

Las principales características son las siguientes (Knezevic, 1996a; Torres, 2005; Dhillon, 1999):

1.2.5.2.1. La función de mantenibilidad

La función de distribución de la variable aleatoria TTR se denomina “*Función de Mantenibilidad*” y se representa por $M(t)$, la cual indica la probabilidad de que la funcionalidad del sistema sea recuperada en el momento especificado de mantenimiento, o antes (tiempo empleado t), y se expresará matemáticamente como:

$$M(t) = P(\text{funcionalidad sea recuperada en el tiempo } t \text{ o antes}) \quad [1.54]$$

$$M(t) = P(TTR \leq t) \quad \rightarrow \quad M(t) = \int_0^t m(t) dt \quad [1.55]$$

Donde, $m(t)$ es la función de densidad de TTR.

1.2.5.2.2. Tiempo esperado de recuperación

La esperanza de la variable aleatoria TTR puede usarse para el cálculo de esta característica del proceso de recuperación:

$$E(TTR) = \int_0^{\infty} t \cdot m(t) dt \quad [1.56]$$

La característica anterior se conoce también con el nombre de Tiempo Medio de Recuperación (Mean Time To Restore, MTTR), que también puede describirse como:

$$E(TTR) = MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt \quad [1.57]$$

Que representa el área bajo la función complementaria de la mantenibilidad.

1.2.5.2.3. Relación entre Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad

Es indiscutible la estrecha relación que estas tres funciones mantienen durante la vida de un elemento o sistema, la cual se muestra en el esquema de la Figura 1.19:

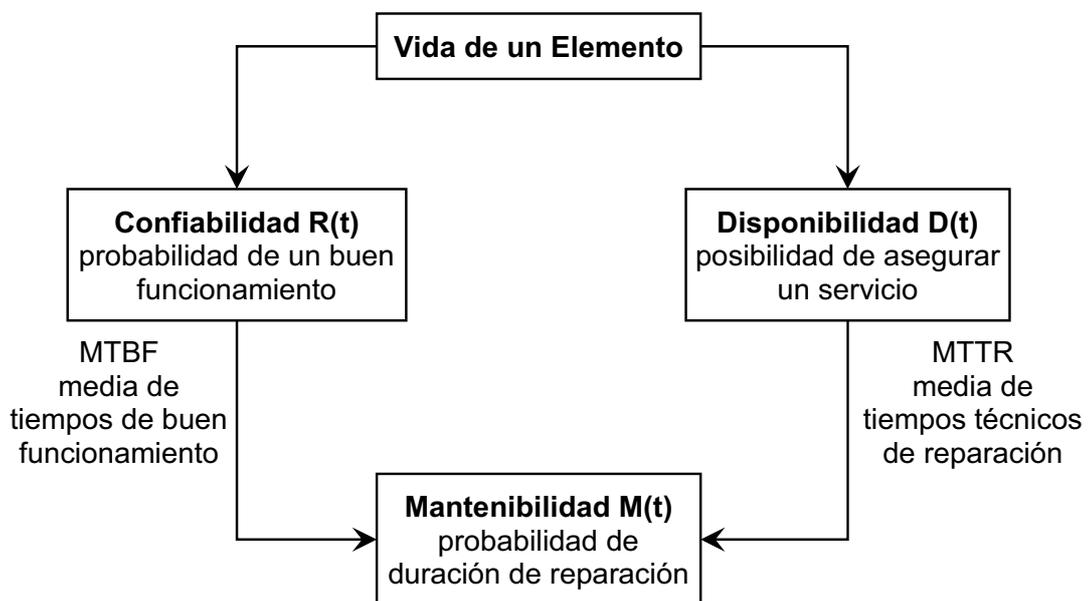


Figura 1.19. Relación entre Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad [1.58]$$

Donde:

MTBF: Media de los tiempos de buen funcionamiento (Mean Time Between Failures)

MTTR: Media de los tiempos técnicos de reparación (Mean Time to Restore)

Las funciones de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad se pueden enfocar de forma provisional (antes del uso) o de manera operacional (durante o después del uso). Estas tres funciones, llamadas respectivamente $R(t)$, $M(t)$ y $D(t)$, son funciones de tiempo.

1.2.5.2.3.1. MTBF y MTTR

El MTBF, o media de los tiempos de buen funcionamiento, es el valor medio entre paros consecutivos, para un período dado de la vida de un dispositivo:

$$MTBF = \frac{\sum_0^n TBF_i}{n} \quad [1.59]$$

De igual forma, el MTTR, o media de los tiempos técnicos de reparación, será:

$$MTTR = \frac{\sum_0^n TTR_i}{n} \quad [1.60]$$

Estos valores pueden ser calculados (después de observaciones), estimados, prefijados o extrapolados.

En el la Figura 1.20 se puede observar la relación existente entre los tiempos de buen funcionamiento TBF y los tiempos técnicos de reparación TTR.

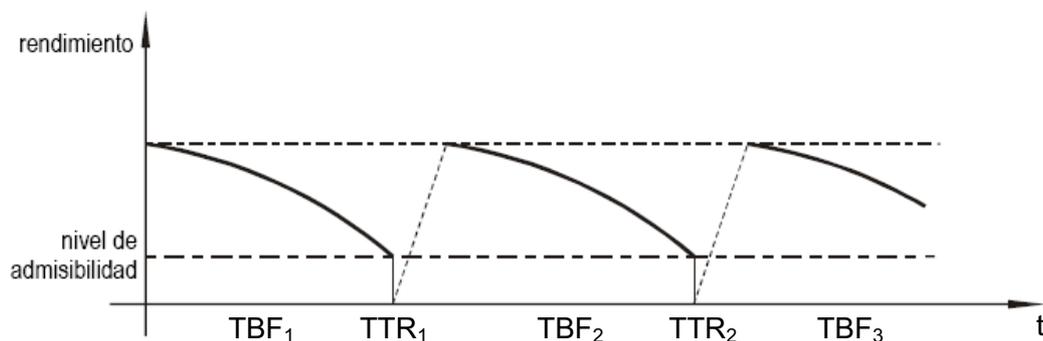


Figura 1.20. Relación entre los TBF y TTR

1.2.6. LA EVALUACIÓN ANTROPOMÉTRICA DE LA MANTENIBILIDAD

Es de vital importancia que los fabricantes de maquinaria, al considerar la interface de usuarios y personal de mantenimiento con el sistema, tengan en cuenta sus características biológicas. Esto se lo realiza mediante un análisis antropométrico de mantenibilidad.

El objetivo principal del análisis antropométrico de mantenibilidad en la configuración del diseño, es considerar las limitaciones de la actuación humana respecto al tamaño del cuerpo y la fuerza física. Se debe evaluar el acceso al sistema, la localización, la disposición, el peso y el tiempo de reparación, incluyendo las características humanas como parámetros de diseño. El análisis verifica que el diseño propuesto para el nuevo sistema permitirá al personal de mantenimiento acceder, retirar, alinear e instalar equipos con eficacia, dentro de los límites de trabajo del sistema y de su entorno de mantenimiento operativo.

Por tanto, la evaluación antropométrica identifica los requisitos para disponer o reacomodar la localización y configuración del equipo, a fin de suministrar suficiente acceso y espacio de trabajo para el personal de mantenimiento; e identifica además las características estructurales y de los equipos, que impiden la realización de tareas por inhibir o dificultar los movimientos del personal de mantenimiento.

Los resultados de evaluaciones antropométricas de mantenibilidad conducen a diseños ampliamente mejorados en las áreas de provisiones del sistema de procedimientos de acceso, disposición, montaje, almacenamiento y tareas de mantenimiento de los equipos.

Los beneficios de la evaluación antropométrica de mantenibilidad incluyen tiempos menores de reparación, costos menores de mantenimiento, mejores sistemas de apoyo, mayor seguridad y reducción de la necesidad de rediseño.

Queda a los usuarios de los sistemas, y en especial a los ingenieros de mantenimiento, el asegurar que dichos sistemas hayan considerado las dimensiones estructurales del grupo humano usuario, durante la evaluación antropométrica de mantenibilidad (Knezevic, 1996a).

Entre las dimensiones estructurales que considera la *Antropometría* (Niegel y Freivalds, 2001), que es la ciencia que se encarga de medir el cuerpo humano, para analizar un grupo poblacional específico, están las mostradas en la Figura 1.21:



Figura 1.21. Dimensiones estructurales del cuerpo humano

(Niegel y Freivalds, 2001)

En la actualidad hay programas de Ingeniería Industrial que proveen estas dimensiones estructurales, de acuerdo al tipo de población a analizarse.

1.3. ESTUDIO COMPARATIVO DEL MANTENIMIENTO

1.3.1. EL PROCESO DE MANTENIMIENTO

Como ya se consideró anteriormente, el fallo de un sistema es definido como un suceso cuya realización provoca, o bien la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas, o bien la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos especificados; independientemente de las razones de su aparición, dicho fallo causará la transición del sistema desde su estado satisfactorio o de

funcionamiento “SoFu”, a un nuevo estado insatisfactorio conocido como estado de falla “SoFa”.

Todos los usuarios desean, por razones obvias, que los sistemas se mantengan en un estado de funcionamiento o SoFu durante tanto tiempo como sea posible. Para lograrlo, es necesario “ayudar” al sistema a mantener su funcionalidad durante la operación, realizando las tareas apropiadas. Algunas de estas tareas son exigidas o sugeridas por los diseñadores o fabricantes. Sin embargo, a pesar de todas las tareas realizadas, no puede posponerse indefinidamente el momento en que el sistema deja de ser funcional. A partir de ahí, es necesario realizar otras tareas para que recupere su funcionalidad. Esto conduce al concepto de mantenimiento que incluye todas las tareas que realiza el usuario para conservar el elemento o sistema en el estado SoFu, o para recuperarlo a ese estado (Knezevic, 1996a; Knezevic, 1996b).

De ahí que, el proceso durante el que se mantiene la capacidad del sistema para realizar una función, es conocido como **proceso de mantenimiento**, y se define como:

“El conjunto de tareas de mantenimiento realizadas por el usuario para mantener la funcionalidad del sistema durante su vida operativa” (Knezevic, 1996b).

Por tanto, la entrada para el proceso de mantenimiento está constituida por la funcionalidad de cualquier sistema creado por el hombre, que deba ser conservada por el usuario, mientras que la salida del proceso consiste en el sistema funcional, como se muestra en la Figura 1.22.

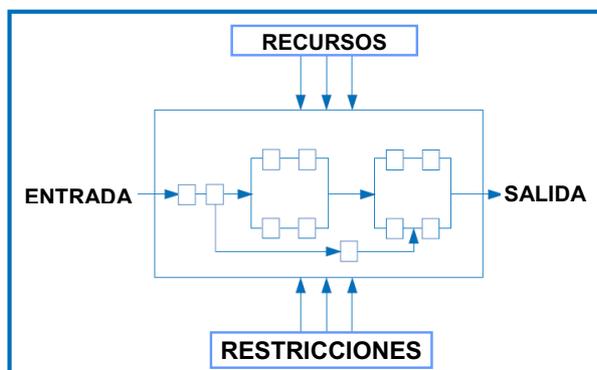


Figura 1.22. El proceso de mantenimiento

1.3.1.1. Análisis del proceso de mantenimiento

Durante la realización del proceso de mantenimiento intervienen factores como sus objetivos, sus recursos y sus restricciones, cuyo tratamiento incidirá en el éxito o fracaso de dicho proceso (Knezevic, 1996b; Tavares, 2001).

1.3.1.1.1. *Objetivos de las tareas de mantenimiento*

Los objetivos de las tareas realizadas durante un proceso de mantenimiento pueden ser enumerados como sigue:

1. Reducción del cambio de condición, con lo que se consigue un alargamiento de la vida operativa del sistema.
2. Garantía de la confiabilidad y seguridad exigidas, lo que reduce la probabilidad de presencia de fallos.
3. Consecución de una tasa óptima de consumo para elementos como combustible, lubricantes, neumáticos, etc., lo que contribuye al costo-eficacia del proceso de operación.
4. Recuperación de la funcionabilidad del sistema, una vez que se ha producido la transición al SoFa.

1.3.1.1.2. *Recursos*

Se necesitan ciertos recursos para facilitar la ejecución del proceso de mantenimiento. Dichos recursos necesarios para la realización exitosa de toda tarea de mantenimiento pueden agruparse en las siguientes categorías:

1. *Abastecimiento o aprovisionamiento*: incluye el suministro de todos los repuestos, elementos de reparación, consumibles, suministros especiales y artículos de inventario necesarios para apoyar al proceso de mantenimiento.
2. *Equipos de prueba y apoyo*: incluye todas las herramientas, equipos especiales de vigilancia de la condición, equipos de comprobación, metrología y calibración, bancos de mantenimiento, y equipos auxiliares de servicio necesarios para apoyar a las tareas de mantenimiento asociadas al elemento o sistema.

3. *Personal*: se incluye el necesario para la instalación, comprobación, manejo y realización del mantenimiento del elemento o sistema y de los equipos necesarios de prueba y apoyo. Debe considerarse la formación específica del personal necesario para cada tarea de mantenimiento.
4. *Instalaciones*: incluye las instalaciones especiales precisas para la ejecución de las tareas de mantenimiento. Deben considerarse las plantas industriales, edificios, edificaciones portátiles, fosos de inspección, diques secos, refugios, talleres de mantenimiento, laboratorios de calibración y otras instalaciones para reparaciones especiales y revisiones generales relacionadas con cada tarea de mantenimiento.
5. *Datos técnicos*: procedimientos de comprobación, instrucciones de mantenimiento, procedimientos de inspección y calibración, procedimientos de revisiones generales, instrucciones de modificación, información sobre las instalaciones, planos y especificaciones que son necesarios para realizar las funciones de mantenimiento del sistema. Tales datos no sólo se refieren al sistema, sino también al equipo de prueba y apoyo, transporte y manejo del equipo, equipo de instrucción e instalaciones.
6. *Recursos informáticos*: comprende los ordenadores y sus accesorios, software, bases de datos, etc., necesarios para realizar las funciones de mantenimiento. Incluye tanto la vigilancia de la condición como el diagnóstico.

1.3.1.1.3. Restricciones

Los procesos de mantenimiento tienen sus propias restricciones, las más frecuentes son:

1. Presupuesto.
2. Programación, tiempo disponible.
3. Reglamentaciones de seguridad.
4. Entorno, clima.
5. Lenguas extranjeras.

6. Cultura/costumbres tradicionales.

Cuando se analiza un proceso de mantenimiento es imperativo considerar tanto los recursos como las restricciones, a fin de conseguir un óptimo control de unas operaciones tan complejas, que tienen un gran impacto en la seguridad, confiabilidad, costo, prestigio y otras características decisivas para la administración competitiva de las operaciones.

1.3.1.2. El mantenimiento y la disponibilidad

Como ya se citó anteriormente, la disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionabilidad de un elemento o sistema. De ahí que, para poder asegurar una alta disponibilidad operativa del sistema, se debe poder realizar el mantenimiento durante los tiempos de inmovilización programados, bien durante paradas cortas entre ciclos de operación, o bien durante una parada nocturna (Knezevic, 1996b).

1.3.1.3. El mantenimiento y la seguridad

La realización de cualquier tarea de mantenimiento está asociada con un cierto riesgo, tanto respecto de la realización incorrecta de una tarea de mantenimiento específica, como de las consecuencias que la realización de la tarea acarrea en otro componente del sistema, esto es, la posibilidad de inducir un fallo en el sistema durante el mantenimiento (Knezevic, 1996b).

1.3.1.4. El mantenimiento y la economía

La realización de cualquier tarea de mantenimiento está asociada con unos costos, tanto en términos de costo de recursos de mantenimiento, como de costo de las consecuencias de no tener el sistema disponible para la operación. Por lo tanto, los departamentos de mantenimiento son uno de los mayores centros de costos, que exigen a la industria miles dólares cada año, habiéndose convertido así en un factor crítico en la ecuación de rentabilidad de muchas organizaciones. En consecuencia, puesto que las operaciones de mantenimiento se vuelven cada vez más costosas, cada vez más los usuarios se preocupan por la ventaja competitiva que el proceso de mantenimiento puede proporcionar a una organización.

Finalmente se puede concluir que, una vez que se proporciona la funcionalidad, la principal preocupación del usuario es alcanzar la disponibilidad y seguridad más elevadas posibles, con la menor inversión de recursos.

La incidencia que el mantenimiento tiene sobre factores como la seguridad, economía y disponibilidad, ratifica su importancia como uno de los factores determinantes en la consecución de los objetivos de los usuarios en la capacidad operativa, disponibilidad y prestigio (Knezevic, 1996b; Cabrera, 2006).

1.3.2. ANÁLISIS DE LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO

Todos los usuarios desean que los sistemas se mantengan en estado de funcionamiento SoFu, durante tanto tiempo como sea posible. Para lograr este objetivo, es necesario “ayudar” al sistema a mantener su funcionalidad durante la operación, realizando las tareas apropiadas.

Bajo este contexto, *“una tarea de mantenimiento es el conjunto de actividades que debe realizar el usuario para mantener la funcionalidad del elemento o sistema”* (Knezevic, 1996b).

De esta forma, la entrada para el proceso de mantenimiento está representada por la necesidad de ejecución de una tarea específica a fin de conservar la funcionalidad del elemento o sistema, mientras que la salida es la propia realización de la tarea de mantenimiento, como se muestra en la Figura 1.23.

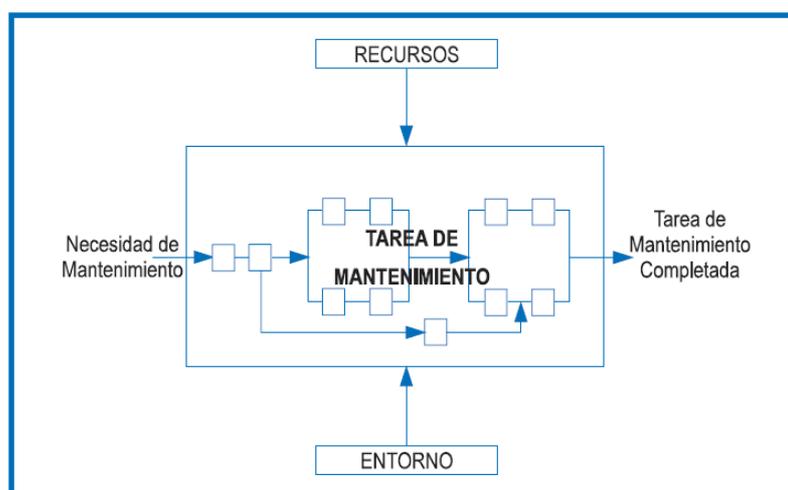


Figura 1.23. Tarea de mantenimiento

Es preciso observar que cada tarea específica requiere recursos específicos para su finalización, llamados recursos para la tarea de mantenimiento. Así como considerar que cada tarea se realiza en un entorno específico, que puede tener un impacto significativo en la seguridad, precisión y facilidad de la finalización de la tarea (Knezevic, 1996b).

1.3.2.1. Duración de la tarea de mantenimiento

En la práctica de ingeniería normalmente se acepta que tareas de mantenimiento supuestamente idénticas, realizadas bajo similares condiciones, requieran diferentes lapsos de tiempo para su ejecución. Las razones principales para estas variaciones se pueden clasificar en tres grupos (Knezevic, 1996b; Torres, 2005):

1. *Factores personales*: representan la influencia de la habilidad, motivación, experiencia, actitud, capacidad física, vista, autodisciplina, formación, responsabilidad y otras características similares relacionadas con el personal que realiza la tarea de mantenimiento.
2. *Factores condicionales*: representan la influencia del entorno operativo y las consecuencias que ha producido el fallo en la condición física, forma, geometría y características similares del elemento o sistema sometido a mantenimiento.
3. *Factores de entorno*: reflejan la influencia de aspectos como temperatura, humedad, ruido, iluminación, vibración, momento del día, época del año, viento, etc. en el personal de mantenimiento durante la ejecución de la tarea de mantenimiento.

Consecuentemente, la única forma de evaluar el impacto de todos estos factores, y de muchos más, sobre la duración de las tareas de mantenimiento, es usar la teoría de probabilidades como base para la descripción cuantitativa de dicha duración.

Por tanto, se define la duración de la tarea de mantenimiento mediante la variable aleatoria TTR (Time To Restore) y su distribución de probabilidad. Las características más usadas para su descripción cuantitativa son:

1. **Función de mantenibilidad:** $M(t)$, que es la función de distribución de la variable aleatoria TTR y representa la probabilidad de que la tarea de mantenimiento considerada se finalice satisfactoriamente en un tiempo especificado t , o antes:

$$M(t) = P(\text{tarea de mantenimiento se finalice en el tiempo } t, \text{ o antes}) \quad [1.61]$$

$$M(t) = P(TTR \leq t)$$

$$M(t) = \int_0^t m(t) dt$$

Donde $m(t)$ es la función de densidad de probabilidad de TTR.

2. **Tiempo TTR_p :** que representa el tiempo empleado en mantenimiento, para el que se finalizará un porcentaje dado de las tareas de mantenimiento consideradas. Es la abscisa del punto cuya ordenada representa un porcentaje de recuperación dado, como se puede observar en la Figura 1.24. Matemáticamente, TTR_p puede representarse como:

$$TTR_p = t \rightarrow \text{para el que } M(t) = P(TTR \leq t) = \int_0^t m(t) dt = P \quad [1.62]$$

El utilizado con más frecuencia es el tiempo TTR_{90} que representa la duración del tiempo de recuperación para el que el 90% de la tarea de mantenimiento considerada ha finalizado.

$$TTR_{90} = t \rightarrow \text{para el que } M(t) = P(TTR \leq t) = \int_0^t m(t) dt = 0,9$$

3. **Duración esperada del tiempo de mantenimiento, MTTR:** que representa la esperanza de la variable aleatoria TTR y que puede usarse para el cálculo de esta característica del proceso de mantenimiento:

$$E(TTR) = \int_0^{\infty} t \cdot m(t) dt \quad [1.63]$$

La característica anterior se conoce también como la duración media de la tarea de mantenimiento, representada por MTTR. Se puede también escribir

como:

$$E(TTR) = MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt \quad [1.64]$$

Que representa el área bajo la función complementaria de la de mantenibilidad.

En la Figura 1.24 se muestra la representación gráfica de una hipotética función de mantenibilidad y los valores porcentuales más frecuentemente usados para TTR_p .

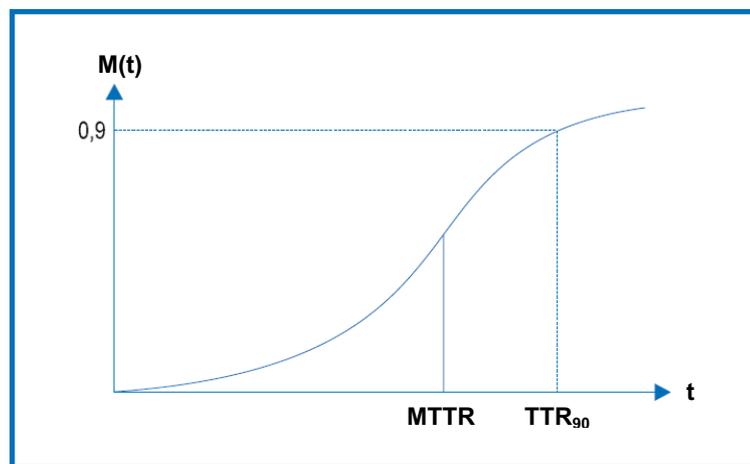


Figura 1.24. Medidas de la Mantenibilidad

1.3.2.2. Clasificación de las tareas de mantenimiento

Según su objetivo, las tareas de mantenimiento se pueden clasificar en las tres siguientes categorías (Knezevic, 1996b):

1. Tareas de mantenimiento correctivo,
2. Tareas de mantenimiento preventivo,
3. Tareas de mantenimiento condicional.

1.3.3. TIPOS DE MANTENIMIENTO

La evolución del mantenimiento ha evidenciado diferentes formas de clasificarlo, sin embargo, actualmente la mayoría de autores e ingenieros de mantenimiento coinciden en la siguiente clasificación (Knezevic, 1996b; Torres, 2005; Amendola, 2002):

1. Mantenimiento correctivo,
2. Mantenimiento modificativo,
3. Mantenimiento preventivo: Mantenimiento sistemático y, Mantenimiento condicional o predictivo.

Esta clasificación, aparte de estar acorde casi en su totalidad con la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR), es la que más se ajusta a la práctica actual del mantenimiento.

1.3.3.1. Clasificación del mantenimiento conforme a las normas AFNOR X60010 y 60011

En la actualidad, la tendencia es a normalizar todas las actividades que tienen que ver con el quehacer empresarial. El mantenimiento no se ha excluido de esa tendencia, si bien su aplicación no está ampliamente difundida, la norma AFNOR X60010 y 60011 señala la clasificación mostrada en la Figura 1.25.

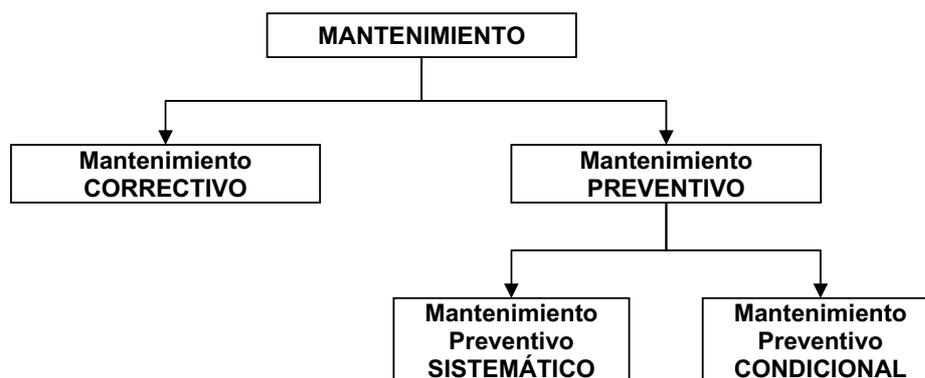


Figura 1.25. Clasificación del mantenimiento según Normas AFNOR
(Torres, 2005)

Así mismo se da las siguientes definiciones:

Mantenimiento: Conjunto de acciones que permiten mantener o restablecer un bien a un estado específico, o para asegurar un servicio determinado.

Mantenimiento correctivo: Mantenimiento efectuado después del fallo.

Mantenimiento preventivo: Mantenimiento efectuado con intención de reducir la probabilidad de fallo de un bien o de un servicio prestado.

Mantenimiento preventivo sistemático: Mantenimiento efectuado según un programa establecido en función del tiempo o el número de unidades de uso.

Mantenimiento preventivo condicional: Mantenimiento subordinado a un tipo de acontecimiento predeterminado (media, diagnóstico).

1.3.3.2. Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo consiste en ir reparando las averías a medida que se van produciendo. El personal encargado de avisar de las averías es el propio usuario de las máquinas y equipos, y el encargado de realizar las reparaciones es el personal de mantenimiento.

El principal inconveniente con la práctica de este tipo de mantenimiento, es que el usuario detecta la avería en el momento que necesita el equipo, ya sea al ponerlo en marcha o bien durante su utilización.

Sus principales características son:

1. Está basado en la intervención rápida, después de ocurrida la avería.
2. Conlleva discontinuidad en los flujos de producción y logísticos.
3. Tiene una gran incidencia en los costos de mantenimiento por producción no efectuada.
4. Tiene un bajo nivel de organización.
5. Se denomina también mantenimiento accidental.

Por lo que se puede señalar que: "**Mantenimiento correctivo** es la intervención necesaria para poder solucionar un defecto o una falla ya ocurrida, en cuyo caso las instalaciones, máquinas o equipos operan con deficiencia o directamente no funcionan" (Torres, 2005).

1.3.3.3. Mantenimiento modificativo

Con éste nombre se conocen las acciones que lleva a cabo mantenimiento, tanto para modificar las características de las instalaciones, máquinas o equipos; como para lograr de ésta forma una mayor confiabilidad o mantenibilidad de los mismos.

Este mantenimiento se lo puede realizar en tres oportunidades de la vida de los componentes:

- La primera oportunidad es cuando se pone en funcionamiento por primera vez. Las instalaciones, sistemas, equipos y máquinas estándar, en ocasiones, necesitan ser adaptados a las necesidades propias de la empresa ya sea por razones del producto o bien por ajustar el costo o posibilidades de mantenimiento. Una instalación que tenga durante su diseño un análisis desde el punto de vista de mantenimiento, evitará problemas posteriores que, en ocasiones, pueden ser difíciles de solucionar.
- La segunda época en la que puede aparecer es durante su vida útil. Se trata de modificar las instalaciones, máquinas o equipos para eliminar las causas más frecuentes que producen fallas. El análisis de las causas de las averías es el origen de éste tipo de mantenimiento y supone la eliminación total de ciertas fallas.
- Por último éste mantenimiento se utiliza cuando una máquina entra en la época de vejez. En ésta ocasión se lo trata de reconstruir para asegurar su utilización durante un intervalo de tiempo posterior a su vida útil. Es en éste momento cuando se introducen todas las mejoras posibles tanto para producción como para mantenimiento.

Una de las razones por las cuales no es muy común encontrar éste tipo de mantenimiento, es por los costos y el tiempo que demanda realizar trabajos de ésta naturaleza, ya que al realizarlo estamos rediseñando de alguna forma la máquina a utilizar, sabiendo la complejidad que esto implica (Torres, 2005).

1.3.3.4. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es la ejecución planificada de un sistema de inspecciones periódicas, cíclicas y programadas y de un servicio de trabajos de mantenimiento previsto como necesario, para aplicar a todas las instalaciones, máquinas o equipos, con el fin de disminuir los casos de emergencias y permitir un mayor tiempo de operación en forma continua.

Es decir, el mantenimiento preventivo, se efectúa con la intención de reducir al mínimo la probabilidad de falla, o evitar la degradación de las instalaciones, sistemas, máquinas o equipos. En definitiva, se trata de una intervención de mantenimiento prevista, preparada y programada antes de la fecha probable de aparición de una falla.

Cualquiera que sea el nivel de mantenimiento preventivo aplicado, subsistirán inexorablemente fallas residuales de carácter aleatorio (Knezevic, 1996b; Torres, 2005).

1.3.3.4.1. Mantenimiento Sistemático

Mantenimiento sistemático es un tipo de mantenimiento preventivo, el cual es efectuado de acuerdo con un plan establecido según el tiempo o el número de unidades fabricadas.

Su realización requiere de amplios conocimientos de la confiabilidad de las instalaciones, máquinas o equipos con los que se está trabajando, es decir, se asegura que existe el conocimiento previo del comportamiento de los materiales. Una herramienta muy valiosa es el estudio estadístico, el que permite determinar los tiempos óptimos de intervención (Knezevic, 1996b; Torres, 2005).

1.3.3.4.2. Mantenimiento Condicional o Predictivo

Este tipo de mantenimiento preventivo se basa en actividades de vigilancia de la condición, que se realizan para determinar el estado físico de un elemento o sistema y, consiste en el análisis de parámetros de funcionamiento, cuya evolución permite detectar un fallo antes de que este tenga consecuencias más graves.

En general, el mantenimiento predictivo, consiste en estudiar la evolución temporal de ciertos parámetros y asociarlos a la evolución de fallos, para así determinar en qué periodo de tiempo, ese fallo va a tomar una relevancia importante, y poder planificar todas las intervenciones con tiempo suficiente, para que ese fallo nunca tenga consecuencias graves. Una de las características más importantes de este tipo de mantenimiento es que no debe alterar el funcionamiento normal de la planta mientras se está aplicando.

La inspección de los parámetros se puede realizar de forma periódica o de forma continua, dependiendo de diversos factores como son: el tipo de planta, los tipos de fallos a diagnosticar y la inversión que se quiera realizar (Knezevic, 1996b; Torres, 2005).

1.3.3.4.2.1. Parámetros de vigilancia de la condición

En la práctica de ingeniería hay dos tipos diferentes de parámetros que permiten evaluar la condición del elemento o sistema (Knezevic, 1996b):

1. Indicador adecuado de la condición (Relevant Condition Indicator, RCI). Es un parámetro observable que indica la condición del elemento o sistema, en el instante de la comprobación (niveles de presión, vibración, ruido, etc.; tensión de una correa, la geometría de las ruedas, etc.)
2. Estimador adecuado de la condición (Relevant Condition Predictor, RCP). Es un parámetro observable que describe la condición del elemento en cada instante del tiempo operativo (grosor de las paredes de tuberías, de las pastillas y zapatas de frenos, la longitud de grietas, etc.)

1.3.3.4.2.2. Técnicas de ensayo no destructivos

Entre las técnicas más utilizadas para determinar la condición de un elemento o sistema, están las técnicas de ensayo no destructivos. Este tipo de ensayo está dirigido fundamentalmente a la detección de defectos causados por fatiga; pues es sabido, estadísticamente, que la mayoría de las fallas estructurales, sobre todo en piezas solicitadas por acciones dinámicas, se debe a la fatiga.

Con la idea de poder reforzar los programas de mantenimiento en función de mejorar la calidad y la productividad de la planta, estas son algunas de las herramientas y los ensayos del mantenimiento predictivo más frecuentemente usados (Knezevic, 1996b; Torres, 2005):

1. Análisis de Aceite.
2. Termografía (análisis infrarrojo).
3. Análisis de vibración.

4. Monitoreo de motores eléctricos y análisis de las condiciones.
5. Alineado de precisión y dispositivos de balanceo.
6. Monitoreo de tonelaje.
7. Inspección mediante partículas magnéticas.
8. Inspección por ultrasonido.
9. Inspección Radiográfica.
10. Inspección mediante líquidos penetrantes.

1.3.4. MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL “TPM” VERSUS RCM

1.3.4.1. Introducción al TPM

El Mantenimiento Productivo Total “TPM” (Total Productive Maintenance), es una técnica desarrollada en el Japón en la década de 1970, como una necesidad de mejorar la calidad de sus productos y servicios. El TPM es la continuidad de la evolución de metodologías tecnológicas de mantenimiento, según tres etapas precursoras, conocidas como: Escuela Latina (Francia - mitad de la década de 1960), Investigaciones Rusas (Rusia - al término de la década de 1960) y Tero tecnología (Inglaterra - inicio de la década de 1970).

La **Escuela Latina** presupone que el aumento de la productividad de las empresas, se obtiene a través del mantenimiento que, por medio de un sistema informatizado e integrado, moviliza los recursos y trabajo en equipo de varios segmentos y diferentes niveles de jerarquía, motivados y coordinados bajo una misma dirección.

En las **Investigaciones Rusas** es creado el concepto de "Ciclo de Mantenimiento", definido como el intervalo comprendido entre dos "Revisiones Generales", que implican todos los trabajos de ajustes y sustituciones ejecutadas, durante ese período. Entre dos "Revisiones Generales", son intercaladas inspecciones sistemáticas de detección de averías o verificaciones diversas.

La **Tero tecnología** es la alternativa técnica capaz de combinar los medios financieros, estudios de confiabilidad, evaluaciones técnico económicas y métodos de gestión, con el objetivo de lograr que los ciclos de vida de los equipos

sean cada vez menos dispendiosos (el mantenimiento constituye el corazón de cualquier sistema tero tecnológico).

El TPM está considerado como una estrategia compuesta por una serie de actividades ordenadas, que una vez implantadas ayudan a mejorar la competitividad de una organización industrial o de servicios. Se considera como estrategia, ya que ayuda a crear capacidades competitivas a través de la eliminación rigurosa y sistemática de las deficiencias de los sistemas operativos. El TPM permite diferenciar una organización en relación a su competencia debido al impacto en la reducción de los costos, mejora de los tiempos de respuesta, confiabilidad de suministros, el conocimiento que poseen las personas y la calidad de los productos y servicios finales.

El **JIPM** (Japan Institute of Plan Maintenance) define el TPM como un sistema orientado a lograr:

- Cero accidentes
- Cero defectos
- Cero perdidas

Estas acciones deben conducir a la obtención de productos y servicios de alta calidad, mínimos costos de producción, alta moral en el trabajo y una imagen de empresa excelente. No solo deben participar las áreas productivas, se debe buscar la eficiencia global con la participación de todas las personas de todos los departamentos de la empresa. La obtención de las "**cero pérdidas**" se debe lograr a través de la promoción de trabajo en grupos pequeños, comprometidos y entrenados para lograr los objetivos personales y de la empresa (Torres, 2005; Tavares, 2001).

1.3.4.2. Estrategia de las 5S

Con el desarrollo del TPM se comprobó de forma fundamental que, además de la necesidad que cada uno de los miembros de la empresa buscase la limpieza y organización, para la mejora de sus actividades y del ambiente laboral de un modo general; los atributos de orden, aseo y disciplina, también influían en

la mejora de la productividad. De ahí que se hizo imprescindible la aplicación de la estrategia denominada de las "5S" durante su implementación.

La estrategia de las "5S" es el fundamento del modelo de productividad industrial creado en Japón y hoy aplicado en empresas occidentales. Las **5S** representan acciones que son principios expresados con cinco palabras japonesas que comienzan con **S**, cada palabra tiene un significado importante para la creación de un lugar digno y seguro donde trabajar (Torres, 2005; Tavares, 2001; Amendola, 2002). Estas cinco palabras son:

1. Clasificar (Seiri)
2. Orden (Seiton)
3. Limpieza (Seiso)
4. Limpieza Estandarizada (Seiketsu)
5. Disciplina (Shitsuke)

1.3.4.3. Optimizando el TPM

Durante muchos años, el hoy desaparecido John Moubray, el brillante mentor de RCM2 (Reliability-Centered Maintenance), rechazó la posibilidad que existiera un marco superador de su exitosa y probada visión de cómo organizar adecuadamente el mantenimiento de una empresa. Fue por eso que en más de una oportunidad su fuerte carácter e ideología chocara directamente contra la visión del JIPM (Japan Institute of Plant Maintenance) y el TPM.

Ante esta situación que implicaba un choque de titanes del mantenimiento mundial, haciendo gala de la sabiduría milenaria del pueblo japonés, el Ingeniero Takutaro Suzuki (por entonces Presidente del JIPM) volvió a darle al mundo una gran lección; estudió profundamente el RCM2 y tuvo la delicadeza de aceptar en su libro TPM in Process Industries, que para optimizar la aplicación del TPM, debía utilizarse la metodología RCM.

Si bien la iniciativa de Suzuki es digna de admirar, los expertos que hoy siguen los pasos de Moubray han admitido que el RCM aún puede aportar algo más a la mejora del TPM.

En síntesis se puede mencionar que mientras que el TPM toma una forma mucho más global y orientada a la gestión de la empresa como un todo, fijando metas a alcanzar; el RCM2 es un proceso altamente estructurado, pensado para llevarnos a lograr muchas de dichas metas (Sotuyo, 2004).

1.3.5. COSTOS DE MANTENIMIENTO

En la actualidad, el mantenimiento se ha convertido en uno de los mayores centros de costo y a la vez en un factor crítico en la ecuación de rentabilidad de muchas organizaciones, de ahí la importancia que tiene en mantenimiento conseguir que los costos sean lo más bajos posibles.

Los costos de mantenimiento, por lo general, se agrupan en cuatro bloques (Torres, 2005; Tavares, 2001; Knezevic, 1996b):

CFJ: Costos Fijos

CV: Costos Variables

CFN: Costos Financieros

CFA: Costo por Falla

1.3.5.1. Costos fijos

La principal característica de estos costos es que no dependen del volumen de producción. Los costos fijos de mantenimiento están compuestos, principalmente, por la mano de obra y materiales necesarios para la realización de las actividades del mantenimiento preventivo.

Este costo tiende a asegurar el estado de la instalación a mediano y largo plazo. La disminución del presupuesto y recursos destinados a su ejecución, limita la cantidad del mantenimiento preventivo, aunque en un primer momento supone un ahorro para la empresa, este ahorro implica un menor índice de confiabilidad en el estado de las máquinas, equipos, instalaciones y sistemas.

1.3.5.2. Costos variables

Estos costos son proporcionales a la producción realizada y, en mantenimiento lo componen, entre otros, la mano de obra necesaria para el mantenimiento correctivo.

Resulta difícil reducir este tipo de costo en mantenimiento, ya que está directamente ligado a la necesidad de efectuar una reparación para poder seguir produciendo, no obstante se puede reducirlo evitando que se produzcan averías en forma inesperada.

1.3.5.3. Costos financieros

Los costos financieros referidos al mantenimiento son los que surgen tanto del valor de los repuestos como de las amortizaciones de las máquinas que se encuentran en reserva para asegurar la producción.

Los costos del almacenamiento de los repuestos necesarios para poder realizar las reparaciones implican un desembolso de dinero para la empresa, que limita su liquidez. Si los repuestos son utilizados con cierta frecuencia el costo financiero es bajo, pero cuando tardan mucho tiempo en ser utilizados es alto, ya que no produce ningún beneficio para la empresa.

Dentro de estos costos financieros, también está el costo que supone tener ciertas instalaciones o máquinas duplicadas, para obtener una mayor confiabilidad de los sistemas productivos.

1.3.5.4. Costo por falla

El costo por falla se refiere al costo o pérdida de beneficio que la empresa tiene por causas relacionadas directamente con mantenimiento.

En empresas productivas los costos por falla se deben principalmente a:

- Pérdidas de materia prima.
- Descenso de la productividad de la mano de obra como consecuencia de la realización de reparaciones por parte de mantenimiento.
- Pérdidas de energía por malas reparaciones o por no realizarlas.
- Rechazos de productos por falta de calidad adecuada.
- Producción perdida durante la reparación no programada.
- Contaminación del medio ambiente, debido a reparaciones realizadas en forma defectuosa o por no haberlas realizado, estas implican desembolsos importantes de dinero para la empresa.

- Averías que pongan en riesgo a las personas o a las instalaciones.

A los costos que pueden generar estos hechos, se les debe adicionar el monto de las reparaciones para volver a la normalidad. En muchos casos el costo directo de la reparación puede ser pequeño frente al costo por falla que se puede originar. Este costo será mayor en la medida que mayor sea la automatización y la amortización de la instalación, y empeorará en empresas que trabajan con el método Just in Time o cero stock.

1.3.5.5. Costo total de mantenimiento

Si se suma estos cuatro costos: fijos, variables, financieros y los que se producen por falla, se obtendrá el Costo Total de Mantenimiento, este costo dará una idea global de la gestión de mantenimiento.

CTT = Costo Total de Mantenimiento

$$CTT = CFJ+CV+CFN+CFA \quad [1.65]$$

1.3.5.6. Costo óptimo o de equilibrio

La Gestión de Mantenimiento debe realizar un control integral de los costos que contemple todos los aspectos, que de una u otra manera pasan por sus manos, y que afectan el desarrollo de la empresa y la obtención del máximo beneficio posible.

Los costos de mantenimiento no son independientes entre sí, sino que se relacionan directamente o inversamente. Así, se incrementan los costos financieros cuando se dispone de instalaciones, sistemas, máquinas o equipos duplicados, pero se reduce los costos por falla. Si se aumentan los costos en mantenimiento preventivo, las fallas reducirán su frecuencia y gravedad, por lo que también lo hará el costo del mantenimiento correctivo. El aumento de los costos del mantenimiento preventivo tiende a disminuir los del correctivo pero en proporciones diferentes. Los costos del correctivo no pueden estimarse con antelación, mientras que los preventivos parten de una planificación.

Un exceso en la realización del mantenimiento preventivo acaba por hacer descender la disponibilidad al necesitar que el equipo esté fuera de servicio más de lo necesario. También habrá que analizar la realización del mantenimiento

predictivo, ya que este ayudará a reducir el mantenimiento correctivo; este tipo de mantenimiento reduce su costo en la medida que aumentan las máquinas y equipos a controlar.

Por lo que se puede concluir que es menester establecer un equilibrio en los costos, para llegar a un costo óptimo. La gestión propia de mantenimiento debe buscar el punto de menor costo y adecuar la aplicación de los distintos tipos de mantenimiento para mantenerse en dicho punto.

Para encontrar este costo óptimo se pueden desagregar sus componentes, realizar una tabla, graficarlos y de esta forma encontrar el punto de menor valor sobre la curva de costos totales; este será entonces el costo óptimo o de equilibrio, como se puede observar en la Figura 1.26.

Bloque A	Bloque B
Mano de obra mantenimiento preventivo	Mano de obra de mantenimiento correctivo por averías
Mano de obra mantenimiento programado	
Repuestos programados	Repuestos por averías
Mano de obra indirecta	
Pinturas, lubricantes, etc.	Costos de fallo
Costos financieros	Costos energéticos
Paradas de mantenimiento preventivo	Costos ambientales

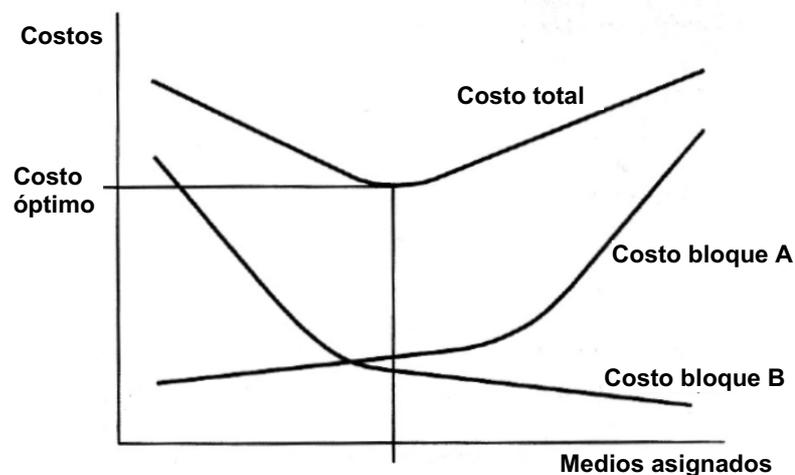


Figura 1.26. Costo óptimo o de equilibrio

1.4. INTRODUCCIÓN AL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD

El *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad* (Reliability Centered Maintenance – RCM) fue desarrollado en un principio por la industria de la aviación comercial de los Estados Unidos, en cooperación con entidades gubernamentales como la NASA y privadas como la Boeing. Desde 1974, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, ha usado el RCM, como la filosofía de mantenimiento de sus sistemas militares aéreos. El éxito del RCM en el sector de la aviación, ha hecho que otros sectores como el de generación de energía, petrolera, química, gas, refinación y la industria de manufactura, se interesen en implantar esta filosofía de gestión del mantenimiento, adecuándola a sus necesidades de operación (Amendola, 2002).

El desarrollo que ha tenido el mantenimiento hasta llegar al RCM es presentado a continuación.

1.4.1. EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO

Durante los últimos años, el mantenimiento ha cambiado, quizás más que cualquier otra disciplina gerencial. Estos cambios se deben principalmente al enorme incremento en número y en variedad de los activos físicos, aumento de la automatización, mayor complejidad de la maquinaria, nuevas técnicas de mantenimiento y un nuevo enfoque de la organización y de las responsabilidades del mismo.

El mantenimiento también está respondiendo ante nuevas expectativas, como son una creciente toma de conciencia para evaluar hasta qué punto las fallas de los equipos afectan a la seguridad y al medio ambiente, conciencia de la relación entre el mantenimiento y la calidad del producto y la presión de alcanzar una alta disponibilidad en la planta al mismo tiempo que se controlen los costos.

Frente a esta sucesión de grandes cambios, los responsables de la gestión del mantenimiento están buscando un nuevo camino. Alrededor de todo el mundo, se trata de encontrar un marco de trabajo estratégico que sintetice los nuevos avances en un modelo coherente, de forma de poder evaluarlos racionalmente y

aplicar el que mejor satisfaga sus necesidades y las de la compañía. Dentro de este contexto, el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad se presenta como una de las mejores alternativas (Amendola, 2002; Campbell, 1999).

La evolución del mantenimiento se puede seguir a través de tres generaciones y, el RCM se ha tornado rápidamente en la piedra fundamental de la denominada Tercera Generación.

A continuación un análisis de dicha evolución:

1.4.1.1. La Primera Generación

Cubre el período que se extiende hasta la segunda guerra mundial. En ese entonces la industria no estaba altamente mecanizada, por lo que el tiempo de parada de máquina no era de mayor importancia. Además, la mayor parte de los equipos era simple, y la gran mayoría estaban sobredimensionados, lo que los hacía confiables y fáciles de reparar. Como resultado no había necesidad de un mantenimiento sistemático más allá de una simple rutina de limpieza, servicio y lubricación (Moubray, 2004; Amendola, 2002).

1.4.1.2. La Segunda Generación

Durante la Segunda Guerra Mundial todo cambió drásticamente, la demanda de bienes aumentó rápidamente, al mismo tiempo que decaía abruptamente el número de trabajadores industriales; esto llevó a un aumento en la mecanización.

En los años 50 había aumentado la cantidad y complejidad de todo tipo de máquinas, la industria estaba empezando a depender de ellas. Al incrementarse esta dependencia, comenzó a concentrarse la atención en el tiempo de parada de máquina, lo que llevó a la idea de que las fallas en los equipos podían y debían ser prevenidas, dando lugar al concepto de ***mantenimiento preventivo***. La aplicación de este concepto durante la década de los 60, consistió principalmente en reparaciones mayores a intervalos regulares prefijados.

El costo del mantenimiento comenzó a crecer rápidamente con relación a otros costos operacionales, lo cual llevó al desarrollo de ***sistemas de planeamiento y control del mantenimiento***.

Finalmente, la suma de capital ligado a activos fijos junto con un elevado incremento en el costo de ese capital, llevó a la gente a buscar la manera de maximizar la vida útil de dichos activos (Moubray, 2004; Amendola, 2002).

1.4.1.3. La Tercera Generación

Desde mediados de la década de los 70, el proceso de cambio en la industria ha adquirido aún más impulso; dicho cambio ha sido clasificado en nuevas expectativas, nuevas investigaciones y nuevas técnicas (Moubray, 2004; Amendola, 2002).

1.4.1.3.1. Nuevas expectativas

Actualmente el crecimiento en la mecanización y automatización han tornado a la *confiabilidad* y a la *disponibilidad* en factores clave en diversos sectores de la industria y de los servicios. Esta mayor automatización también significa que más y más fallas afectan la capacidad de mantener *parámetros de calidad* satisfactorios.

El *tiempo de parada de máquina* indiscutiblemente es un factor que afecta a la capacidad de producción de los activos físicos al reducir la producción, aumentando los costos operacionales y afectando el servicio al cliente. Los efectos adversos de este factor se han visto agravados por la tendencia mundial hacia los sistemas "just-in-time", donde los reducidos inventarios y material en proceso hacen que una pequeña falla en un equipo problemático haga parar toda la planta.

Las nuevas expectativas de seguridad y cuidado medioambiental que la sociedad exige hoy en día a las organizaciones para su operación, sumado a lo anteriormente expresado, hacen que la dependencia a la integridad de los activos físicos cobre ahora una nueva magnitud que va más allá del costo, y que se torna en una cuestión de supervivencia de la organización.

Al mismo tiempo que crece la dependencia a los activos físicos, crece también el *costo de tenerlos y operarlos*; por tanto, para asegurar el máximo retorno a la inversión que representa tenerlos, deben mantenerse trabajando eficientemente tanto tiempo como se requiera.

Por último el *costo de mantenimiento*, el cual sigue hoy en día en aumento, ha pasado de ser un costo casi sin importancia a estar en la más alta prioridad en el control de costos.

En la Figura 1.27 se puede apreciar la evolución que las expectativas del mantenimiento han seguido a través de las distintas generaciones.

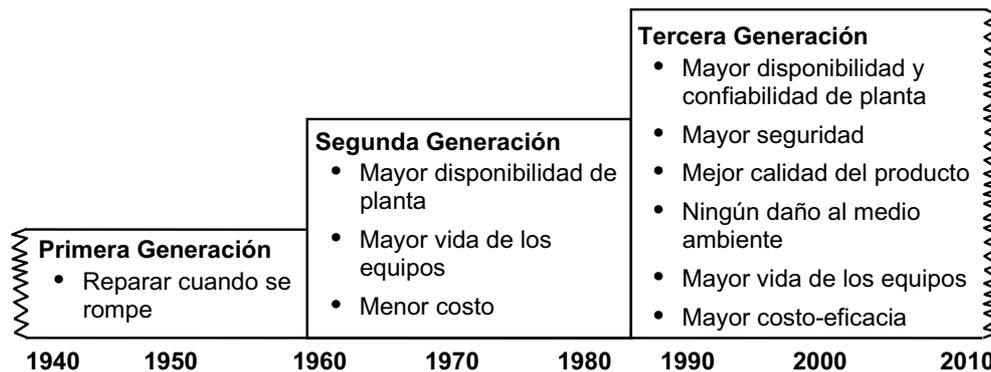


Figura 1.27. Expectativas crecientes de mantenimiento

1.4.1.3.2. Nuevas Investigaciones

Más allá de la existencia de mayores expectativas, las nuevas investigaciones están cambiando muchas de las creencias más profundas referidas a la edad y a las fallas. En particular, se evidencia que cada vez hay menos conexión entre la edad de la mayoría de los activos y la probabilidad de que estos fallen. La Figura 1.28 muestra como en un principio la idea era simplemente que a medida que los elementos envejecían eran más propensos a fallar.

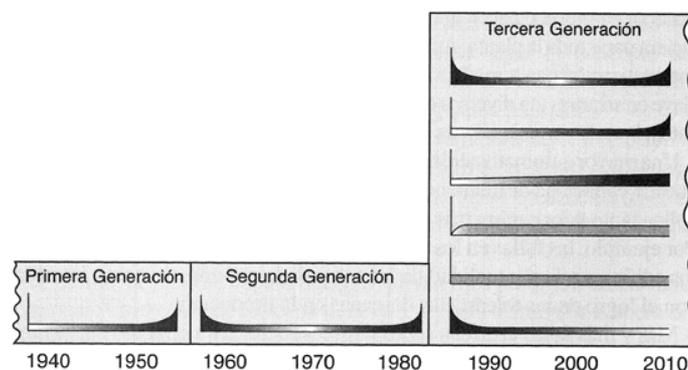


Figura 1.28. Cambios en los puntos de vista sobre la falla de equipos
Moubray, 2004

Una firme creencia de la “mortalidad infantil” llevó a la Segunda Generación” a creer en la curva de la “bañera”. Sin embargo, como se puede observar en la figura anterior, investigaciones en la Tercera Generación revelan seis patrones de falla que realmente ocurren en la práctica. Una de las conclusiones más importantes de dichas investigaciones es que un gran número de tareas que surgen de los conceptos tradicionales de mantenimiento, a pesar de que se realicen exactamente como se planeó, no logran ningún resultado, mientras que otras son contraproducentes y hasta peligrosas.

1.4.1.3.3. Nuevas Técnicas

Ha existido una creciente explosión de nuevos conceptos y técnicas de mantenimiento. Cientos de ellos han sido desarrollados en los últimos 25 años, y emergen aún más cada día. En la Figura 1.29 se puede observar cómo ha crecido el énfasis en los clásicos sistemas administrativos y de control para incluir nuevos desarrollos en diferentes áreas.

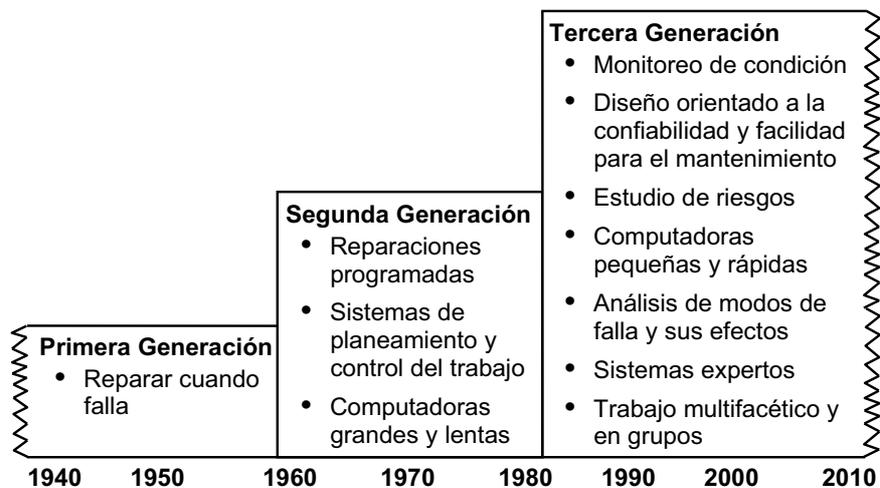


Figura 1.29. Cambios en las técnicas de Mantenimiento

Estos nuevos desarrollos incluyen:

- *Herramientas de soporte para la toma de decisiones*, tales como el estudio de riesgo, análisis de modos de falla y sus efectos, y sistemas expertos
- *Nuevos métodos de mantenimiento*, tal como el monitoreo de condición.

- *Diseño de equipos*, con un mayor énfasis en la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento
- *Un drástico cambio en el modo de pensar de la organización* hacia la participación, trabajo en grupo y flexibilidad.

Ante todo lo anteriormente expuesto, uno de los mayores desafíos que enfrenta el personal de mantenimiento, es no sólo aprender en qué consisten estas técnicas sino decidir cuales valen la pena para sus organizaciones. Si se realiza la elección adecuada es posible mejorar el rendimiento de los activos y al mismo tiempo contener y hasta reducir el costo del mantenimiento. Sin embargo, si la elección es inadecuada se crean nuevos problemas mientras empeoran los ya existentes.

1.4.2. DEFINICIÓN DE RCM

Desde el punto de vista de la ingeniería hay dos premisas fundamentales en el manejo de cualquier activo físico: debe ser mantenido y ocasionalmente quizá también necesite ser modificado.

Los diccionarios más importantes definen *mantener* como *causar que continúe* (Oxford), *conservar su estado existente* (Webster), o *conservar cada cosa en su ser* (Real Academia Española). Esto sugiere que “mantenimiento” significa preservar algo; por otro lado “modificar” algo significa cambiarlo de alguna manera. Esta diferencia entre mantener y modificar tiene profundas implicaciones que serán analizadas más adelante.

Entonces, cuando nos disponemos a mantener algo, estamos basándonos en el hecho de que todo activo físico es puesto en funcionamiento porque alguien quiere que haga algo; en otras palabras, se espera que cumpla una función o ciertas funciones específicas. Por tanto, se puede definir al mantenimiento como:

Mantenimiento: asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan.

Los requerimientos de los usuarios van a depender de dónde y cómo se utilice el activo (contexto operacional), lo cual lleva a la siguiente definición formal de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Moubray, 2004; Amendola, 2002):

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad: un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual.

1.4.3. BASES CONCEPTUALES

El RCM es necesario porque (Amendola, 2002; Moubray, 2002):

- Responde a las debilidades derivadas de los enfoques tradicionales de mantenimiento
- Permite asociar y sopesar los riesgos del negocio con el fallo de los activos.
- Facilita de manera sistemática, la determinación del enfoque óptimo que se le deben dar a los recursos de la función mantenimiento.

Su aplicación busca definir estrategias de Mantenimiento que:

- Mejoren la seguridad
- Mejoren el rendimiento operacional de los activos
- Mejoren la relación costo/riesgo-efectividad de las tareas de mantenimiento
- Sean aplicables a las características de una falla
- Minimicen la ocurrencia de fallas, o al menos sean efectivas en mitigar las consecuencias una vez ocurrida la misma, es decir, un mantenimiento que funcione y sea costo-efectivo
- Puedan ser documentadas, auditadas y ser susceptibles de actualizar.

1.4.4. CONFIABILIDAD OPERACIONAL

Confiabilidad operacional es la capacidad de una instalación (proceso, tecnología, gente), para cumplir su función o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional específico.

De ahí que, la confiabilidad operacional puede definirse como una serie de procesos de mejora continua, que incorporan en forma sistemática, avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción.

En un programa de optimización de la confiabilidad operacional de un sistema, es necesario el análisis de los siguientes cuatro parámetros operacionales: confiabilidad humana, confiabilidad de los procesos, mantenibilidad y confiabilidad de los equipos (Amendola, 2002; Amendola y Depool, 2007), como se puede observar en la Figura 1.30.

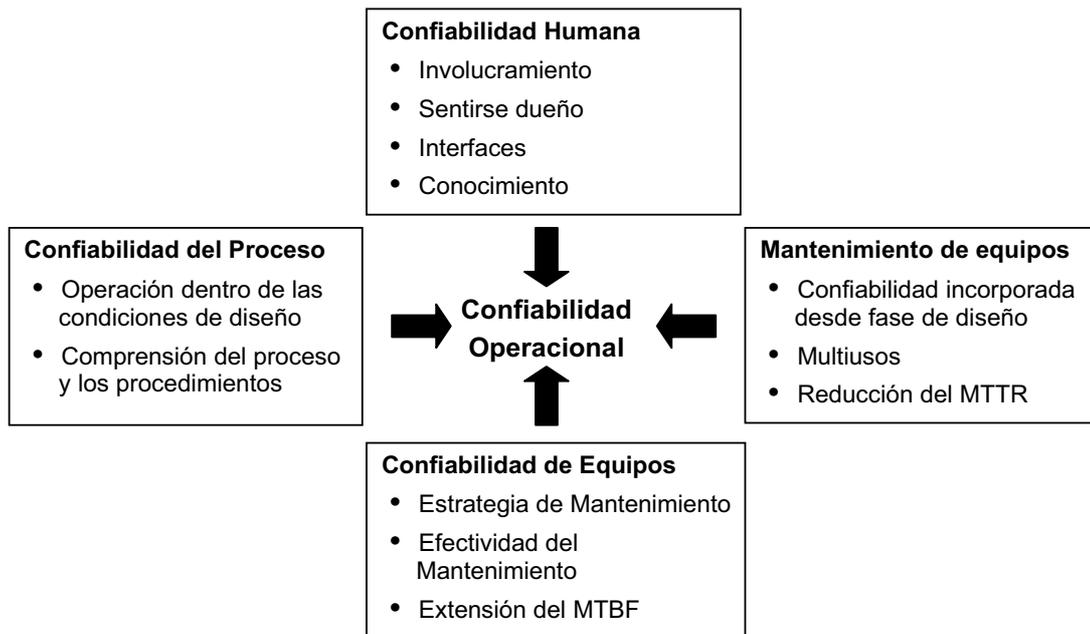


Figura 1.30. Sistema de confiabilidad Operacional
(Amendola, 2002)

1.4.4.1. Confiabilidad Humana

Se requiere de un alto compromiso de la gerencia para liderar los procesos de capacitación, motivación e incentivos de los equipos de trabajo; para generar nuevas actitudes y lograr un alto involucramiento del talento humano.

1.4.4.2. Confiabilidad de los Procesos

Implica la operación de equipos entre parámetros, o por debajo de la capacidad de diseño; es decir, sin generar sobrecarga de los equipos, y el correcto entendimiento de los procesos y procedimientos.

1.4.4.3. Mantenibilidad de equipos

Esto es, la probabilidad de que un equipo pueda ser restaurado a su estado operacional en un período de tiempo determinado. Lo cual depende de la fase de diseño y de la confiabilidad de los equipos de trabajo, y puede ser medido a través del indicador MTTR.

1.4.4.4. Confiabilidad de los equipos

Determinada por las estrategias de mantenimiento y por la efectividad del mismo. Puede ser medida a través del indicador MTBF.

La variación en conjunto o individual que pueda sufrir cada uno de los cuatro parámetros presentados, afectará el comportamiento global de la confiabilidad operacional de un determinado sistema.

La confiabilidad en mantenimiento se estudia como la probabilidad que un equipo sobreviva sin fallas un determinado período de tiempo bajo determinadas condiciones de operación. Sin embargo, esta definición no demuestra en realidad todos los alcances que conlleva, puesto que la confiabilidad es más que una probabilidad; es una nueva forma de ver el mundo, es una cultura que debe implementarse a todos los niveles de una organización, desde la alta dirección hasta el empleado de más bajo nivel. La confiabilidad como cultura busca que todas las actividades de producción y en general todas las tareas se efectúen bien desde la primera vez y por siempre, no se acepta que se hagan las cosas precariamente o a medias.

Entre los beneficios que se pueden obtener con la implantación de un sistema integrado de Confiabilidad Operacional, se pueden mencionar los siguientes:

- Aumento de las utilidades por continuidad en la producción
- Reducción del tiempo y optimización de la frecuencia de las paradas programadas y no programadas
- Detección precoz de fallas y optimización de las frecuencias de ejecución de acciones de mantenimiento

- Aumento de la disponibilidad de los activos e instalaciones, mediante mejora continua
- Solución definitiva de múltiples problemas, al identificar y encauzar las fallas en su causa raíz
- Eliminación de conflictos, al cimentar los análisis en hechos y no en suposiciones
- Incremento en la calidad de los procesos y servicios, sobre la base de análisis de los procedimientos y acuerdos mutuos
- Integración de la gestión de operaciones de mantenimiento y producción
- Mejora de la gestión del conocimiento de los procesos y estrategias propias de la organización
- Posicionamiento a nivel global, con el uso de las mejores prácticas de mantenimiento de las empresas de clase mundial.

Existen muchas herramientas de confiabilidad operacional, entre ellas se puede destacar el Análisis de Causa Raíz (RCA) y el Análisis de Criticidad.

1.5. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

Con el paso de los años y con el surgimiento de las nuevas tecnologías, los procesos productivos pasaron de ser manuales a ser parcial y en algunos casos totalmente automatizados, los equipos son cada vez más complejos y más complicados también los sistemas productivos. Por lo tanto, localizar el origen de un fallo se hace cada vez más y más complejo.

Sin embargo, actualmente se cuenta con distintas herramientas que ayudan a resolver algunos de los grandes problemas de la industria actual, como el Análisis de causa raíz y el Análisis de criticidad.

1.5.1. ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (ACR)

Es una herramienta utilizada para identificar las causas que originan los fallos o problemas, de manera de poder evitar su ocurrencia así como sus consecuencias.

Por tal razón algunos autores consideran al ACR como una técnica de identificación de causas fundamentales que conducen a fallos o fallos recurrentes; considerándose además como un análisis deductivo, el cual identifica la relación causal que conduce al sistema, equipo o componente a un fallo. Se utilizan una gran variedad de técnicas y su selección depende del tipo de problema, disponibilidad de la data y conocimiento de las técnicas: análisis causa – efecto, árbol de fallo, diagrama espina de pescado, análisis de cambio, análisis de barreras y eventos y, análisis de factores causales.

El análisis Causa Raíz tiene distintas aplicaciones:

- Análisis de Fallas, para encontrar y eliminar las fallas recurrentes de equipos o procesos críticos, lo cual es una aplicación proactiva
- Análisis de errores humanos, en el proceso de diseño y aplicación de procedimientos
- Análisis de accidentes e incidentes, en sistemas de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional.

La utilización de herramientas como el Análisis de causa raíz, puede ayudar a recordar a gerentes e ingenieros, que tal vez el programa de mantenimiento que no se ejecuta está asociado a la cantidad de fallo que presentan los equipos. Por otro lado, su uso evita que varias situaciones se conviertan muchas veces en una cacería de brujas, cada quien buscando culpables y evadiendo responsabilidades (Amendola, 2002).

1.5.1.1. Aplicación del Análisis Causa Raíz

La aplicación del análisis de causa raíz consta de cuatro etapas básicas:

- Definición del problema
- Efectuar análisis del problema
- Identificar soluciones efectivas
- Implementar soluciones

En la Figura 1.31 se muestra las etapas del ACR y el orden correcto de cada una de ellas:

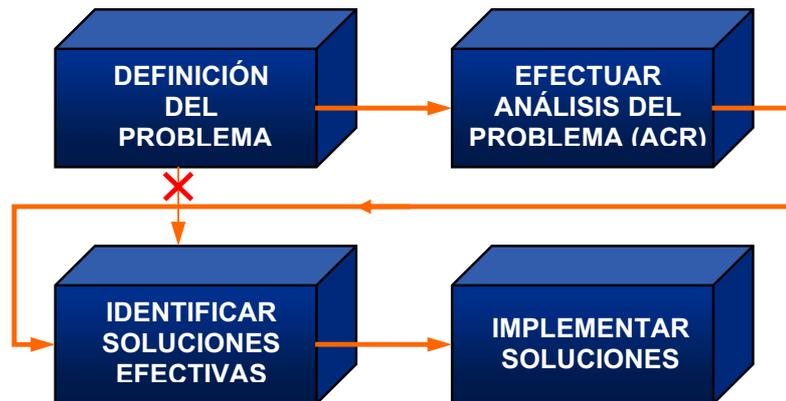


Figura 1.31. Etapas del ACR

1.5.2. ANÁLISIS DE CRITICIDAD

El análisis de criticidad establece un método que sirve de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de una planta compleja, permitiendo subdividir los elementos en secciones que pueden ser manejados de manera controlada y auditable.

Desde el punto de vista matemático la criticidad se puede expresar como:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia} \quad [1.66]$$

Donde la frecuencia está asociada al número de eventos o fallas que presentan el sistema o proceso evaluado y, la consecuencia está referida con el impacto y flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y medioambiente. El modelo básico de análisis de criticidad es el mostrado en la Figura 1.32:

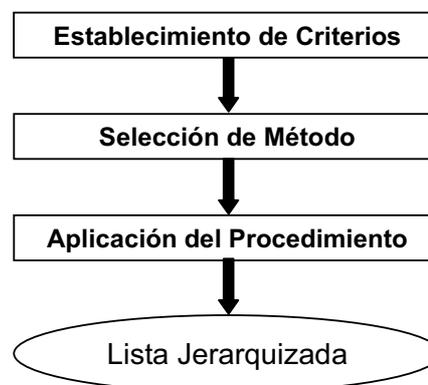


Figura 1.32. Modelo básico de Análisis de Criticidad

El establecimiento de criterios se basa en los seis criterios fundamentales de seguridad, medio ambiente, producción, costos (operacionales y de mantenimiento), tiempo promedio para reparar y frecuencia de falla. Para la selección del método de evaluación se toman criterios de ingeniería, factores de ponderación y cuantificación. Para la aplicación de un procedimiento definido se trata del cumplimiento de la guía de aplicación que se haya diseñado. Finalmente, la lista jerarquizada es el producto que se obtiene del análisis.

Para iniciar un análisis de criticidad se deberá haber identificado al menos una de las siguientes necesidades:

- Fijar prioridades en sistemas complejos
- Administrar recursos escasos
- Crear valor
- Determinar impacto en el negocio
- Aplicar metodologías de confiabilidad operacional

El análisis de criticidad puede ser aplicado en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas y/o componentes que requieran ser jerarquizados en función de su impacto en el proceso o negocio donde formen parte. Sus áreas comunes de aplicación se orientan a establecer programas de implantación y prioridades en los campos de mantenimiento, inspección, materiales, disponibilidad de planta y personal (Dhillon, 1999).

1.5.3. HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE AVERÍAS

Los métodos usados para fijar la política de mantenimiento son insuficientes, por sí mismos, para asegurar la mejora continua en mantenimiento. Será la experiencia quien mostrará desviaciones respecto a los resultados previstos. Por tal motivo, es necesario establecer una estrategia que, además de corregir dichas desviaciones, asegure que todos quienes intervienen en el proceso de mantenimiento se involucren en el proceso de mejora continua del mismo.

Dicha estrategia se basa en el análisis de averías, que no es más que un conjunto de actividades de investigación que, aplicadas sistemáticamente, trata

de identificar las causas de las averías y establecer un plan que permita su eliminación. Por tanto, no se trata tan solo de devolver los equipos a su estado de buen funcionamiento tras la avería, sino de identificar la causa raíz para evitar, si es posible, su repetición. Si ello no es posible se tratará de disminuir la frecuencia de la avería o lograr la detección precoz de la misma de manera que las consecuencias sean tolerables o simplemente se pueda mantener controlada. Su fin, como el de muchas otras estrategias, es mejorar la confiabilidad, aumentar la disponibilidad y reducir los costos.

El uso de las herramientas de análisis de averías en el proceso de mantenimiento, además de las razones generales que justifican la búsqueda de la mejora continua en cualquier proceso, tienen las siguientes razones específicas que justifican esta práctica como su objetivo prioritario:

- Evitar la tendencia a convivir con los problemas
- Evitar la tendencia a simplificar los problemas
- Evitar la tendencia a centrarse en el problema del día

De entre las diversas herramientas, las que más se adaptan para la fase del análisis, siendo las mismas también de confiabilidad operacional, están los histogramas, diagrama de Pareto, diagrama de Ishikawa y, Análisis de árbol de fallos (Torres, 2005; Dhillon, 1999; Smith, 1997).

1.5.3.1. Histogramas

Un histograma es un resumen gráfico de barras verticales, que representa la distribución de los valores producidos por las variaciones de una determinada característica. Su construcción ayuda a comprender la tendencia central, dispersión y frecuencias relativas de los distintos valores. Muestra grandes cantidades de datos dando una visión clara y sencilla de su distribución.

1.5.3.2. Diagrama de Pareto

Es una representación gráfica de los datos obtenidos sobre un problema, que ayuda a identificar y seleccionar los aspectos prioritarios que hay que tratar. También se conoce como Diagrama ABC o Ley de las Prioridades 20-80, que señala que *“el 80% de los problemas que ocurren en cualquier actividad son*

ocasionados por el 20% de los elementos que intervienen en producirlos". Sirve para conseguir el mayor nivel de mejora con el menor esfuerzo posible. Por lo que se considera una herramienta de selección que se aconseja aplicar en la fase inicial que corresponde al enfoque para concretar el problema, así como para seleccionar una causa.

1.5.3.3. Diagrama de Ishikawa

También denominado diagrama Causa-Efecto o *de espina de pescado*, es una representación gráfica de las relaciones lógicas existentes entre las causas que producen un efecto bien definido. Sirve para visualizar, en una sola figura, todas las causas asociadas a una avería y sus posibles relaciones. Ayuda a clasificar las causas dispersas y a organizar las relaciones mutuas. Es, por tanto, una herramienta de análisis aplicable a una segunda fase, donde se determinan las causas.

1.5.3.4. Análisis de Árbol de Fallos

El Análisis de "Árbol de Fallos" (FTA: Fault Tree Analysis), es un método deductivo de análisis que parte de la previa selección de un "suceso no deseado o evento que se pretende evitar", sea este un accidente de gran magnitud o sea un suceso de menor importancia, para averiguar en ambos casos los orígenes de los mismos. El hecho de su gran utilización se basa en que puede proporcionar resultados tanto cualitativos mediante la búsqueda de caminos críticos, como cuantitativos, en términos de probabilidad de fallos de componentes.

Para el tratamiento del problema se utiliza un modelo gráfico que muestra las distintas combinaciones de fallos de componentes y/o errores humanos cuya ocurrencia simultánea es suficiente para desembocar en un suceso accidental.

La técnica consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del Álgebra de Boole, que permite determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen en él. Consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo en sucesos intermedios hasta llegar a sucesos básicos, ligados normalmente a fallos de componentes, errores humanos, errores operativos, etc.

Para la representación gráfica de los árboles de fallos se utilizan una serie de símbolos normalizados, como el mostrado en la Figura 1.33:

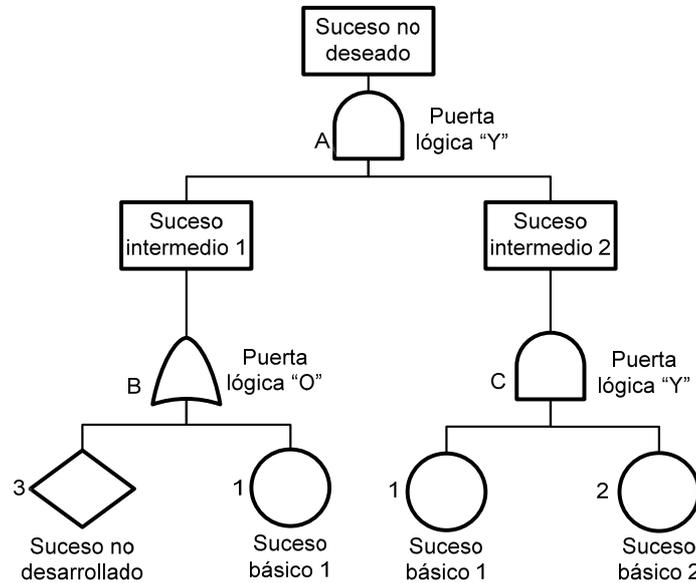


Figura 1.33. Representación gráfica del Árbol de Fallos

Para ser eficaz, un análisis por árbol de fallos debe ser elaborado por personas profundamente conocedoras de la instalación o proceso a analizar y que a su vez conozcan el método y tengan experiencia en su aplicación; por lo que, si se precisa, se deberán constituir equipos de trabajo multidisciplinarios.

1.5.4. LA NORMA SAE JA1011

El creciente reconocimiento mundial del papel fundamental que juega el RCM en la formulación de las estrategias de administración de activos físicos, y la importancia de aplicar RCM correctamente, condujo a la American Society of Automotive Engineers en 1999 a publicar la norma **SAE JA1011: “Criterio de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)”**.

La norma SAE JA1011 establece los criterios que un proceso debe cumplir, de modo de poder ser llamado “RCM” - “Reliability-Centered Maintenance” (SAE International, 1999).

2. METODOLOGÍA

El modelo del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad “RCM” fue desarrollado sobre la base de la revisión bibliográfica de los diferentes conceptos y estrategias que tienen que ver con la gestión del mantenimiento, y a partir de los lineamientos y fundamentos establecidos en las siguientes referencias bibliográficas: [1], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [17], [18], [19], [21], [22], [25] y [26].

2.1. DESARROLLO DEL MODELO DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)

El modelo desarrollado para su implementación en cualquier tipo de industria manufacturera, descrito en el presente capítulo, cumple con cada uno de los preceptos puntualizados en la norma SAE JA1011.

2.1.1. DEFINIR LOS ACTIVOS FÍSICOS

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM basa su aplicación en la relación entre la organización y los elementos físicos que la componen; antes de que se pueda explorar esta relación detalladamente, es necesario saber qué tipo de elementos físicos existen en la empresa, y decidir cuáles son los que deben ser sometidos al proceso de revisión del RCM. En la mayoría de los casos, esto significa que debe realizarse un registro de equipos completo si no existe ya uno.

Luego se deben priorizar los equipos o sistemas, para determinar cuáles serán sometidos al proceso RCM, tomando en cuenta las siguientes características:

- Se percibe de alto riesgo para alcanzar los objetivos de seguridad para las personas o contaminación fijados
- Se percibe de alto riesgo para activos físicos valiosos
- Es un recurso restricción (cuello de botella) o un recurso de capacidad restringida, es decir, que afecta al Throughput¹ (Goldratt, 2003).

¹ Throughput: Velocidad a la cual un sistema genera dinero a través de las ventas.

- Tiene un impacto significativo en términos de confiabilidad, costo operativo o de mantenimiento
- Tiene dedicadas muchas horas a su mantenimiento.

Considerando dichas características y utilizando alguna de las herramientas de análisis descritas anteriormente, se deberá determinar que activos o sistemas serán sometidos al proceso RCM y a qué nivel de análisis.

2.1.2. RCM: LAS SIETE PREGUNTAS BÁSICAS

El proceso RCM, se basa en un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional, a partir de la formulación de las siguientes siete preguntas acerca del activo o sistema que se intenta revisar:

- 1. *¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?***
- 2. *¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?***
- 3. *¿Cuál es la causa de cada falla funcional?***
- 4. *¿Qué sucede cuando ocurre una falla?***
- 5. *¿En qué sentido es importante cada falla?***
- 6. *¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?***
- 7. *¿Qué debe hacerse sino se encuentra una tarea proactiva adecuada?***

2.1.3. FUNCIONES Y SUS ESTÁNDARES DE FUNCIONAMIENTO, CONTEXTO OPERACIONAL

Para definir los objetivos del mantenimiento según los requerimientos de los usuarios se debe obtener un claro entendimiento de las funciones de cada activo físico junto con los parámetros de funcionamiento asociados, razón por la cual el proceso RCM comienza preguntado:

- 1. *¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su contexto operacional actual?***

2.1.3.1. Funciones

La definición de una función debe consistir de un verbo y de un objeto; sin embargo, como los usuarios no esperan sólo que el activo cumpla con una función, sino también esperan que lo haga con un nivel de funcionamiento aceptable, entonces la definición de dicha función – y por ende la definición de los objetivos de mantenimiento para ese activo físico – no está completa a menos que especifique el nivel de funcionamiento deseado por el usuario tan precisamente como le sea posible. Por tanto:

“La definición de una función consiste de un verbo, un objeto y el estándar de funcionamiento deseado por el usuario”.

Por ejemplo, la función primaria de la Figura 2.1 podría enunciarse así: “Transferir agua del tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto”.



Figura 2.1. Capacidad inicial versus funcionamiento deseado

2.1.3.2. Estándares de funcionamiento

El objetivo del mantenimiento es asegurarse que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que haga. La magnitud de aquello que los usuarios quieren que el activo haga puede definirse a través de un estándar mínimo de funcionamiento.

Las leyes de la física nos dicen que cualquier sistema organizado que es expuesto al mundo real se deteriorará. Entonces, si el deterioro es inevitable, debe ser tolerable; por lo que, cuando cualquier activo físico es puesto en funcionamiento debe ser capaz de rendir más que el estándar mínimo de funcionamiento deseado por el usuario. Lo que el activo físico es capaz de rendir es conocido como *capacidad inicial o confiabilidad inherente*. La Figura 2.2 ilustra la relación correcta entre esta capacidad y el funcionamiento deseado.

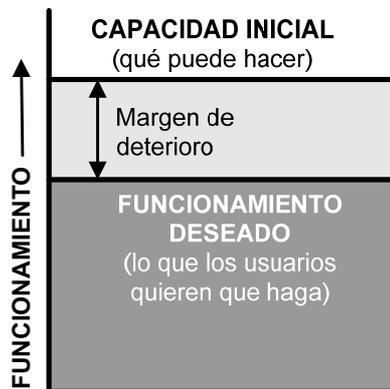


Figura 2.2. Margen de deterioro

Por tanto, el funcionamiento puede ser definido de las siguientes dos maneras:

- Funcionamiento deseado (lo que el usuario quiere que haga): Desempeño
- Capacidad inicial o propia (lo que puede hacer)

Considerando que el mantenimiento sólo puede restaurar al activo físico a su capacidad inicial, se dice que dicho activo es mantenible si el funcionamiento deseado está dentro del margen de su capacidad inicial, como se puede observar en la Figura 2.3:

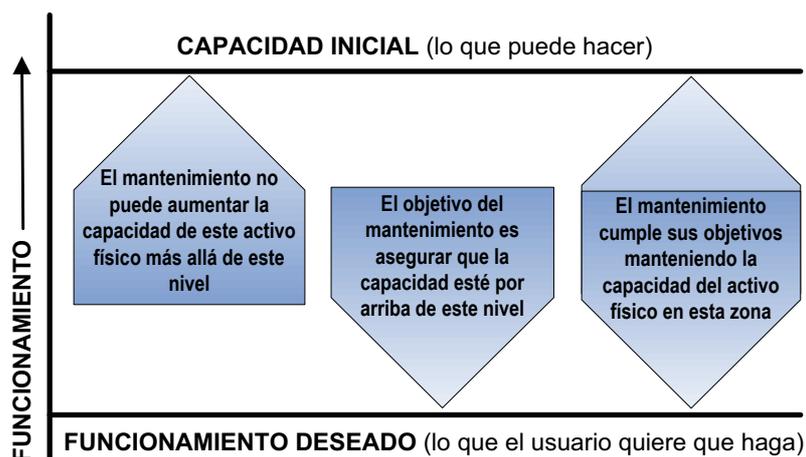


Figura 2.3. Un activo físico mantenible

Por otro lado si el funcionamiento deseado excede la capacidad inicial, ningún tipo de mantenimiento puede hacer que el activo cumpla con esta función.

En otras palabras, dichos activos físicos no son mantenibles, como lo muestra la Figura 2.4.

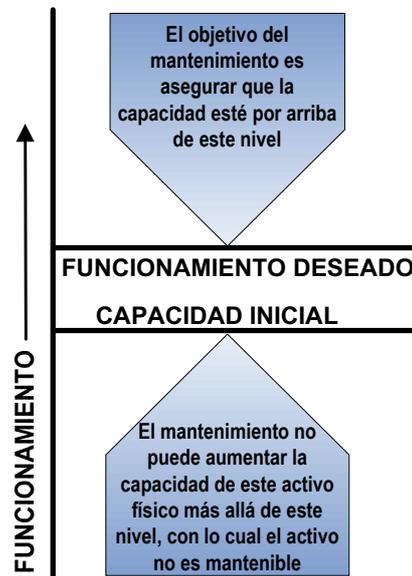


Figura 2.4. Una situación no mantenible

Por tanto se puede concluir que el funcionamiento deseado de un activo físico debe estar dentro del margen de su capacidad inicial. Por lo cual, es importante conocer la capacidad inicial de dicho activo y, cuál es exactamente el funcionamiento mínimo que el usuario está dispuesto a aceptar dentro del contexto en que va a ser utilizado. A continuación se detallan las formas de definir un estándar de funcionamiento.

2.1.3.2.1. Estándares de funcionamiento múltiple

Muchas de las descripciones de funciones incorporan más de uno y en algunos casos muchos estándares de funcionamiento.

Por ejemplo, una función en un reactor de una planta química que trabaja en lotes puede listarse como: calentar hasta 500 Kg. de un producto X desde la temperatura ambiente al punto de ebullición (125°C) en una hora. Como se puede ver, tanto el peso del producto como la temperatura y el tiempo presentan diferentes expectativas de funcionamiento.

2.1.3.2.2. *Estándares de funcionamiento cuantitativos*

Los estándares de funcionamiento deben definirse, siempre que sea posible, en forma exacta, es decir en forma cuantitativa.

2.1.3.2.3. *Estándares cualitativos*

Más allá de la necesidad de ser precisos, a veces es imposible especificar parámetros de funcionamiento cuantitativos; entonces será necesario acudir a los cualitativos. En estos casos es necesario que el usuario y quien hace mantenimiento se aseguren de compartir un entendimiento común de la característica cualitativa, antes de establecer un sistema destinado a preservarla.

2.1.3.2.4. *Estándares de funcionamiento absolutos*

Una descripción de una función que no da estándares de funcionamiento por lo general implica que se trata de un absoluto. Por ejemplo, el concepto de contención se asocia con casi todos los sistemas cerrados; las descripciones de función en estos casos pueden escribirse como “Contener un líquido X”. La ausencia de estándares de funcionamiento sugiere que el sistema debe contener todo el líquido, y que cualquier pérdida da cuenta de una falla.

2.1.3.2.5. *Estándares de funcionamiento variables*

Las expectativas de funcionamiento (o esfuerzo aplicado) a veces varían infinitamente entre dos extremos, como se puede observar en la Figura 2.5:

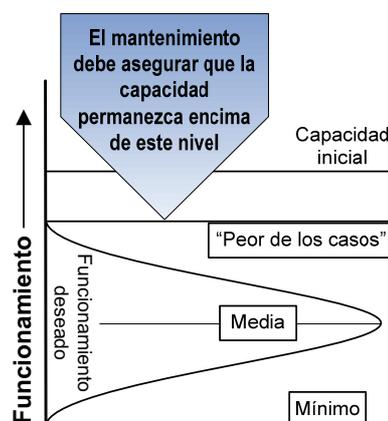


Figura 2.5. Estándares de funcionamiento variables

2.1.3.2.6. Límites superiores e inferiores

Contrastando con los estándares de funcionamiento variable, algunos sistemas muestran capacidad variable. Estos son sistemas que no pueden llegar a funcionar exactamente según el mismo estándar cada vez que operan; en casos como este, los límites de funcionamiento deseados se conocen como límites de especificación superior e inferior, como puede observarse en la Figura 2.6:

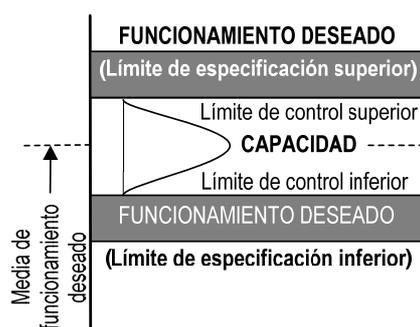


Figura 2.6. Límites superiores e inferiores

2.1.3.3. El Contexto Operacional

Considerando que el RCM es un “proceso utilizado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo físico en su *contexto operacional*”, se entiende que este contexto se inserta por completo en el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento. Por lo que se considera que el contexto operacional no solo afecta drásticamente las funciones y las expectativas de funcionamiento, sino también afecta la naturaleza de los modos de falla que pueden ocurrir, sus efectos y consecuencias, la periodicidad con la que pueden ocurrir y qué debe hacerse para manejarlos.

Razón por la cual, al iniciar un proceso de RCM debe tenerse muy claramente entendido el contexto operacional de cualquier proceso o activo físico. Para definir el contexto operacional deberá considerarse, analizarse y registrarse los siguientes factores:

- Si el proceso es continuo o por lotes
- La redundancia o no de procesos o activos físicos
- Estándares de calidad

- Estándares medio ambientales
- Riesgos para la seguridad
- Turnos de trabajo
- Productos en proceso
- Tiempo de reparación
- Repuestos
- Demanda de mercado
- Abastecimiento de materias primas.

2.1.3.3.1. Procesos por lotes y continuos

En plantas manufactureras la característica más importante del contexto operacional es el tipo de proceso. Su alcance va desde operaciones de procesos continuos en los cuales casi todos los equipos están interconectados, hasta operaciones de trabajo donde la mayoría de las máquinas trabajan independientemente. En procesos continuos, la falla de un activo puede parar toda la planta o reducir drásticamente la producción, a menos que exista sobrecapacidad o estén disponibles equipos de reserva. Por otro lado, en plantas que trabajan por lotes la mayoría de las fallas afectará solamente la producción de una máquina o una línea.

Estas diferencias significan que la estrategia de mantenimiento aplicada a un activo que es parte de un proceso continuo puede ser radicalmente diferente a la estrategia aplicada a un activo idéntico que está trabajando en un proceso por lotes.

2.1.3.3.2. Redundancia

La presencia de redundancias (o formas alternativas de producción) es una característica del contexto operacional que debe ser considerada en detalle cuando se definen las funciones de cualquier activo. Generalmente los equipos de reserva, aunque sean idénticos a los que están directamente en el proceso, tienen diferentes requerimientos de mantenimiento.

2.1.3.3.3. Estándares de calidad

Los estándares de calidad y los estándares de servicio al cliente son otros dos aspectos del contexto operativo, que pueden dar lugar a descripciones diferentes de funciones de máquinas que de otra manera serían idénticas.

2.1.3.3.4. Estándares medio ambientales

Un aspecto cada vez más importantes del contexto operacional de cualquier activo es el impacto que tiene (o podría tener) sobre el medio ambiente.

Existe un interés creciente en todo el mundo sobre este tema, lo que significa que cuando mantenemos cualquier activo tenemos que satisfacer dos tipos de “usuarios”: el primero es la gente que opera la máquina; el segundo es la sociedad como un todo, que quiere tanto que el activo como el proceso del cual forma parte no cause ningún daño al medio ambiente. Lo que la sociedad quiere se expresa con el incremento en las exigencias de las regulaciones y los estándares ambientales.

Las penalizaciones a violaciones a dichas regulaciones y estándares son cada vez más severas, por lo que ahora para el personal de mantenimiento la integridad del medio ambiente a largo plazo es un tema particularmente importante.

2.1.3.3.5. Riesgos para la seguridad

Sin duda, los estándares de seguridad son un componente importante del contexto operacional. Hoy en día, un número cada vez mayor de organizaciones han desarrollado por sí mismas o se han adherido a estándares formales con respecto a niveles de riesgo aceptable. En algunos casos, se aplican a nivel corporativo, en otros a plantas individuales y a su vez otros a procesos o activos específicos.

2.1.3.3.6. Turnos de trabajo

La organización de los turnos de trabajo afecta profundamente al contexto operacional. Algunas plantas operan ocho horas por día, cinco días a la semana.

Otras operan continuamente durante los siete días de la semana, y otras operan entre estos dos extremos.

En las plantas que operan en un solo turno, la producción que se pierde a causa de las fallas por lo general puede recuperarse trabajando horas extras, las cuales incrementan el costo de producción; por lo que las estrategias de mantenimiento deben evaluarse a la luz de estos costos.

Por otro lado, si el activo trabaja las 24 horas del día, los siete días de la semana, sólo en contadas ocasiones puede recuperarse el tiempo perdido, por lo cual los tiempos muertos causan pérdidas de ventas. Estos costos son mucho mayores que los de las horas extras, por lo que en estas circunstancias es necesario tratar de prevenir las fallas tanto como sea posible. No obstante, en una planta que trabaja de esta manera se hace mucho más difícil que el equipo se encuentre disponible para realizar mantenimiento, por lo que las estrategias de mantenimiento deben formularse con una dedicación especial.

2.1.3.3.7. Productos en proceso

El trabajo en proceso o semielaborado se refiere a cualquier material que aún se encuentra en etapas intermedias de fabricación y no ha pasado a través de todo su proceso productivo. Las consecuencias de la falla de cualquier máquina están influenciadas por la cantidad de producto en proceso que exista entre dicha máquina y la próxima máquina del proceso.

Si bien las paradas de planta cuestan dinero, también cuesta dinero el mantener existencias de producto en proceso. Por lo que, desde el punto de vista del mantenimiento, se debe lograr un equilibrio entre las implicaciones económicas de las fallas operacionales y el costo de mantener trabajo en proceso para mitigar los efectos de estas fallas o, el costo de hacer mantenimiento proactivo para anticiparse o prevenir las fallas.

2.1.3.3.8. Tiempo de reparación

El tiempo de reparación está influenciado por la velocidad de respuesta a la falla que está a su vez determinada por el sistema de reportes de fallas, por el nivel del personal, y por la velocidad de la reparación misma, la que es función de

la disponibilidad de repuestos, de herramientas adecuadas y de la habilidad de la persona que hace las reparaciones. Estos factores influyen mucho en los efectos y las consecuencias de las fallas, por lo que este aspecto del contexto operacional también debe entenderse claramente.

2.1.3.3.9. Repuestos

La relación que existe entre repuestos y consecuencias de las fallas se articulan en el tiempo que toma obtener los repuestos del proveedor. Si el repuesto no se encuentra en el almacén, el tiempo de reposición determina cuánto tiempo tomará reparar la falla, y por lo tanto la severidad de sus consecuencias. Por otro lado, tener repuestos en almacén también cuesta dinero, con lo que se necesita lograr un balance, analizando caso por caso, entre el costo de tener un repuesto en el inventario y el costo total de no tenerlo.

2.1.3.3.10. Demanda del mercado

A veces el contexto operacional presenta una demanda estacional para los productos y servicios que brinda la organización. Por lo tanto, en el momento de máxima demanda las consecuencias operacionales de la falla son mucho más serias; por lo cual se necesita entender claramente este aspecto del contexto operacional cuando se definen funciones y se evalúan las consecuencias de la falla.

2.1.3.3.11. Abastecimiento de materias primas

Algunas veces el contexto operacional está influenciado por fluctuaciones cíclicas en el abastecimiento de materias primas. Por lo cual este aspecto debe ser considerado, para evitar que durante la temporada, las fallas operacionales que afectan la producción puedan hacer que se pierdan grandes cantidades de materia prima.

2.1.3.3.12. Documentación del contexto operacional

Por todas las razones mencionadas, es esencial asegurarse que toda persona involucrada en el desarrollo de un programa de mantenimiento de cualquier activo físico comprenda totalmente el contexto operacional del mismo.

La mejor manera de realizar esto es documentando el contexto operacional como parte del proceso de RCM, si es necesario se puede llegar a incluir la definición de misión de la organización.

2.1.3.4. Tipos de funciones

Todo activo físico tiene más de una función, por lo general tiene varias. Si el objetivo del mantenimiento es asegurarse que continúe realizando estas funciones, entonces todas ellas deben ser identificadas junto con los parámetros de funcionamiento deseados. A primera vista, esto puede verse como un proceso bastante directo; sin embargo en la práctica casi siempre se vuelve el aspecto más desafiante y el que más tiempo toma en el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento.

Las funciones se dividen en dos categorías principales: funciones primarias y secundarias, y éstas a su vez se dividen en varias subcategorías.

2.1.3.4.1. Funciones primarias

Se conocen como funciones primarias por ser la razón principal por la que es adquirido un activo físico; son las razones por las cuales existe el activo, por lo que deben ser definidas tan precisamente como sea posible. Normalmente es una sola función primaria, pero en algunos casos son dos o más y son fáciles de reconocer. De hecho el nombre de la mayoría de los activos físicos industriales se basa en su función primaria. Por ejemplo la función primaria de una máquina empaquetadora es la de empaquetar objetos, y la de una trituradora es la de triturar, etc.

Para la mayoría de los tipos de equipo los parámetros de funcionamiento asociados a las funciones primarias tienen que ver con velocidad, volumen, y capacidad de almacenamiento; por lo general también necesita considerarse en esta etapa la calidad del producto.

Las funciones primarias se clasifican en las siguientes categorías:

- Funciones primarias múltiples e independientes
- Funciones primarias dependientes o en serie.

2.1.3.4.1.1. Funciones primarias múltiples e independientes

Un activo puede tener más de una función primaria, en este caso cada función puede ser ejecutada independientemente una de la otra. Por ejemplo, el nombre mismo del avión caza/bombardero sugiere que tiene dos funciones primarias; en casos como este, ambas funciones deben listarse en las especificaciones funcionales.

2.1.3.4.1.2. Funciones primarias dependientes o en serie

Puede encontrarse activos que son capaces de realizar dos o más funciones primarias en serie, donde una función debe ser realizada antes que la otra. Por ejemplo, la función primaria de una máquina en una fábrica de alimentos puede ser “llenar 300 latas con comida por minuto” y luego “cerrar 300 latas por minuto”; en este caso para que trabaje correctamente la máquina enlatadora debería llenar las latas antes de cerrarlas.

2.1.3.4.2. Funciones secundarias

Las funciones secundarias son aquellas que si bien no son las razones principales por las que se adquirió un activo físico, son importantes en el funcionamiento y alrededores del proceso. Las funciones secundarias se clasifican en las siguientes siete categorías:

- Ecología – integridad ambiental
- Seguridad/Integridad estructural
- Control/Contención/Confort
- Apariencia
- Protección
- Eficiencia/Economía
- Funciones superfluas.

Aunque las funciones secundarias son usualmente menos obvias que las primarias, la pérdida de una función secundaria puede tener serias consecuencias, a veces hasta más graves que la pérdida de una función primaria. Como resultado, estas funciones frecuentemente necesitan tanto o más

mantenimiento que las funciones primarias, por lo que también deben ser claramente identificadas.

2.1.3.4.2.1. Ecología e integridad ambiental

Las expectativas medio ambientales de la sociedad se han vuelto un factor crítico del contexto operacional de muchos activos, por lo que RCM comienza el proceso de cumplimiento de los estándares asociados con la definición de funciones, expresándolos apropiadamente.

2.1.3.4.2.2. Seguridad

La gran mayoría de los usuarios quieren estar razonablemente seguros que sus máquinas no le causarán ningún daño y menos aún la muerte. En la práctica, la mayoría de los riesgos para la seguridad surgen más adelante en el proceso RCM cuando se analizan los modos de fallas. No obstante, en ciertos casos es necesario listar funciones que traten con riesgos específicos.

2.1.3.4.2.3. Integridad estructural

Muchos activos tienen funciones secundarias del tipo estructural. Éstas por lo general comprenden funciones como la de sostener otro activo, otro subsistema u otro componente.

2.1.3.4.2.4. Control

En muchos casos, los usuarios no sólo quieren que los activos cumplan sus funciones con un determinado estándar de funcionamiento, sino que también desean poder regular dicho funcionamiento. Estas expectativas se sintetizan en funciones separadas. Los estándares de funcionamiento asociados con estas funciones no sólo se relacionan con la facilidad con la que se podría leer y asimilar o recuperar la información, sino que también se relacionan con hacerlo con precisión.

2.1.3.4.2.5. Contención

La contención puede ser considerada como una función secundaria en todos los dispositivos usados para transferir material de cualquier tipo, especialmente fluidos.

2.1.3.4.2.6. Confort

La mayoría de las personas esperan que sus activos no les causen ansiedad, molestia o incomodidad. Dichas expectativas están contenidas en la función confort.

2.1.3.4.2.7. Apariencia

En muchos activos la apariencia engloba una función secundaria específica.

2.1.3.4.2.8. Protección

El desarrollo de los activos físicos en sistemas cada vez más complejos, trajo como consecuencia el crecimiento de forma casi exponencial de las formas en las que pueden fallar así como de la variedad y severidad de las consecuencias de las mismas. Para eliminar (o al menos reducir) estas consecuencias, cada vez se usan más dispositivos de protección automáticos; los cuales pueden trabajar de cinco maneras diferentes:

- Alertando al operario en caso de condiciones de funcionamiento anormales
- Apagando el equipo cuando se produce una falla
- Eliminando o minimizando las condiciones anormales que siguen a la falla
- Reemplazando a la función que ha fallado
- Previniendo la aparición de situaciones peligrosas.

El propósito de estos dispositivos es el de proteger de las fallas a la personas, o proteger a las máquinas o a los productos, y a veces proteger a todos al mismo tiempo.

Cuando se enumeran las funciones de cualquier activo, se debe listar también las funciones de todos los dispositivos de protección.

2.1.3.4.2.9. Economía/eficiencia

Desde el punto de vista del contexto operativo, las expectativas funcionales relativas a los costos usualmente se expresan como presupuestos de gastos. Desde el punto de vista del activo, las cuestiones económicas pueden incluirse

directamente en la definición de funciones que delimitarán las expectativas de los usuarios en relación a temas como la economía de combustible y la pérdida de material en proceso.

2.1.3.4.2.10. Funciones superfluas

A veces se encuentran ciertos componentes u objetos que son completamente superfluos. Esto por lo general cuando el equipo se ha modificado frecuentemente a lo largo del tiempo, o bien cuando el equipo fue sobre especificado. Su tratamiento debe ser muy cuidadoso, ya que a pesar de que no tengan una función positiva, aún pueden fallar y por lo tanto reducir la confiabilidad de toda la planta.

2.1.3.5. Cómo deben listarse las funciones

Una definición funcional escrita adecuadamente define con precisión los objetivos de desempeño. Esto asegura que todos los involucrados conozcan exactamente qué es lo que se quiere, lo que a su vez asegura que las actividades de mantenimiento permanezcan enfocadas hacia las necesidades reales de los usuarios. Las funciones se listan en la columna izquierda de la hoja de información de RCM, mostrada en el Anexo II.

2.1.4. FALLAS FUNCIONALES

2. ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?

2.1.4.1. Falla

En el numeral 2.1.3 se concluyó que la capacidad inicial de un activo debe ser mayor que el estándar de funcionamiento deseado, de manera de poder cumplir con lo que los usuarios desean y admitir el desgaste. Si por alguna razón el activo es incapaz de hacer lo que el usuario desea, este considerará que ha fallado, como se puede observar en la Figura 2.7, de ahí que la definición básica de falla es la siguiente:

Se define “falla” como la incapacidad de cualquier activo de hacer aquello que sus usuarios quieren que haga.

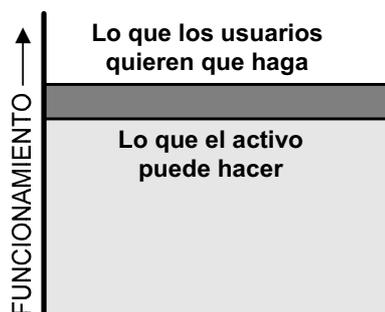


Figura 2.7. Estado general de falla

2.1.4.2. Fallas Funcionales

La definición anterior trata el concepto de falla de manera que se aplica a un activo como un todo. En la práctica, esta definición es un poco vaga ya que no distingue claramente entre el estado de falla (falla funcional) y los eventos que causan este estado de falla (modos de falla). Además resulta simplista, ya que no tiene en cuenta el hecho de que cada activo tiene más de una función, y por lo general cada función tiene más de un estándar de funcionamiento deseado. A continuación sus implicaciones:

2.1.4.2.1. Funciones y fallas

Como cada activo tiene más de una y por lo general varias funciones diferentes y, como es posible que fallen todas y cada una de esas funciones, se deduce que todo activo puede ser afectado por diversos estados de falla diferentes.

Por tanto es más preciso definir una falla en términos de pérdida de una función específica, más que la falla del activo como un todo. Por dicha razón el proceso RCM utiliza el término “falla funcional” para describir estado de falla y no a la falla por sí sola.

2.1.4.2.2. Estándares de funcionamiento y Fallas

El límite entre el funcionamiento satisfactorio y la falla está determinado por el estándar de funcionamiento; dado que este estándar se aplica a funciones individuales, “falla” puede ser definida precisamente por la definición de falla funcional:

Una falla funcional se define como la incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario.

La Figura 2.8 representa el estado de falla funcional.

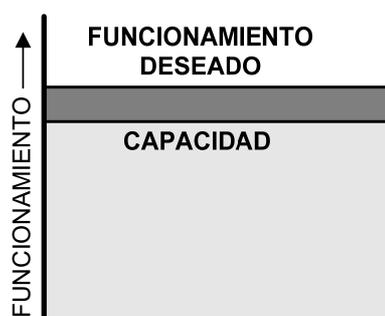


Figura 2.8. Falla Funcional

Los siguientes aspectos respecto de las fallas funcionales deben ser analizados:

- Falla total y parcial
- Límites superiores e inferiores
- Instrumentos de medición e indicadores
- El contexto operacional.

2.1.4.2.2.1. Falla total y parcial

La definición anterior cubre la pérdida total de la función, pero también abarca situaciones en las que aún funciona, pero fuera de los límites admisibles. Una pérdida parcial de función casi siempre proviene de modos de falla diferentes de los que provocan una pérdida total, y las consecuencias casi siempre son diferentes. Por tanto deben registrarse todas las fallas funcionales asociadas a cada función.

Registrar todas las fallas funcionales asociadas con cada función

Nótese que la falla parcial no debe confundirse con la situación en la que el activo, habiéndose deteriorado significativamente, aún está sobre el nivel de funcionamiento requerido por el usuario; como se puede apreciar en la Figura 2.9.

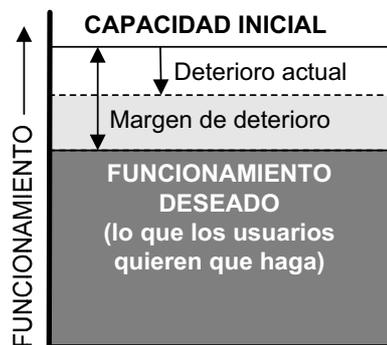


Figura 2.9. El activo sigue estando bien a pesar de cierto deterioro

2.1.4.2.2.2. Límites superiores e inferiores

Los estándares de funcionamiento asociados a algunas funciones incorporan límites superiores e inferiores. Dichos límites significan que el activo físico ha fallado si entrega productos que están por arriba del límite superior, o por debajo del inferior. En estos casos la brecha del límite superior por lo general necesita identificarse por separado de la brecha del límite inferior. Esto se debe a que los modos de falla y/o las consecuencias asociadas por exceder el límite superior suelen ser diferentes de las asociadas por no alcanzar el límite inferior.

2.1.4.2.2.3. Medidores e indicadores

Los límites superior e inferior también pueden aplicarse a los estándares de funcionamiento de medidores e indicadores, sistemas de control y de protección. Dependiendo del modo de falla y sus consecuencias también podría ser necesario tratar sus límites, por separado, en el momento en que se listan las fallas funcionales.

2.1.4.2.2.4. Fallas funcionales y contexto operacional

La definición exacta de falla para cualquier activo depende en gran parte de su contexto operacional. Esto significa que de la misma manera que no se debe generalizar acerca de funciones de activos idénticos, también se tiene que tener cuidado en no generalizar acerca de sus fallas funcionales.

Finalmente, se puede concluir en los siguientes puntos centrales acerca de los estándares de funcionamientos y las fallas:

- El estándar de funcionamiento utilizado para definir una falla funcional, define el nivel de mantenimiento proactivo necesario para evitar esa falla, es decir, para mantener el nivel de funcionamiento requerido.
- Puede ahorrarse mucho tiempo y energía si se definen con claridad los estándares de funcionamiento *antes de que se produzca la falla*.
- Los estándares de funcionamiento utilizados para definir la falla deben ser establecidos por el personal de mantenimiento y de operaciones trabajando en conjunto con cualquier otra persona que tenga algo legítimo que decir acerca del comportamiento del activo.

2.1.4.3. **Cómo deben ser registradas las Fallas Funcionales**

Las fallas funcionales se escriben en la segunda columna de la hoja de información RCM y deben ser codificadas alfabéticamente.

2.1.5. **ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA Y SUS EFECTOS (AMFE)**

Las siguientes dos preguntas del proceso RCM buscan identificar aquellos *modos de falla* que sean posibles causantes de cada falla funcional, y determinar los *efectos de falla* asociados con cada modo de falla. Esto se realiza a través del *análisis de modos de falla y efectos* (AMFE) para cada falla funcional.

3. ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?

4. ¿Qué sucede cuando ocurre una falla?

2.1.5.1. **Modo de Falla**

Cuando se habla de un modo de falla es necesario distinguir entre una “falla funcional” (un *estado* de falla) y un “modo de falla” (un *evento* que puede causar un estado de falla), lo cual lleva a la siguiente definición:

Un modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional.

La mejor manera de mostrar la conexión y la diferencia entre los estados de falla y los eventos que podrían causarlos es primero hacer un listado de fallas funcionales, y luego registrar los modos de falla que podrían causar cada falla funcional, como se muestra en la Figura 2.10.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA		SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA	
		SUB-SISTEMA			
FUNCION		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA (Causa de la falla)	
1	Transferir agua desde el Tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto	A	Incapaz de trasferir agua	1	Cojinetes agarrotados
				2	Impulsor loco, suelto
				3	Impulsor trabado por un cuerpo extraño
				4	El cubo de acople falla por fatiga
				5	Motor quemado
				6	Valvula de ingreso trabada en posición cerrada
				7etc.
		B	Transferir menos de 800 litros por minuto	1	Impulsor gastado
				2	Línea de succión parcialmente bloqueada
				3	

Figura 2.10. Modos de falla de una bomba

La descripción de un modo de falla debe consistir de un sustantivo y un verbo; y debe ser lo suficientemente detallada para poder seleccionar una estrategia de manejo de falla apropiada, pero no tanto como para perder mucho tiempo en el propio proceso de análisis.

Los verbos que se usan para describir los modos de falla deben elegirse cuidadosamente, ya que tienen una influencia muy fuerte en el proceso posterior de selección de políticas de manejo de falla. Por ejemplo, deben usarse con moderación expresiones como “falla” o “rotura” o “mal funcionamiento de”, ya que dan muy poca información sobre cuál podría ser la manera adecuada de manejar esta falla. El uso de verbos más específicos permite seleccionar la política más adecuada dentro de un rango completo de posibilidades.

En el caso de válvulas o interruptores, también debe indicarse si la pérdida de la función se da porque el ítem falla en posición abierta o en posición cerrada.

2.1.5.2. Importancia del análisis de los Modos de Falla

En una planta industrial, las razones por las cuales las máquinas pueden fallar podrían ascender a miles, inclusive hasta decenas de miles. Por lo que la mayoría de gerentes no se sienten muy cómodos al pensar en el tiempo y el esfuerzo involucrado en la identificación de todos estos modos de falla. Pero, no

se puede pasar por alto el hecho que en el día a día *el mantenimiento es realmente manejado al nivel de modo de falla.*

Si en la mayoría de los casos, los modos de falla son discutidos, registrados y manejados *luego* de haber ocurrido; por qué no manejar los eventos *antes* de que ocurran, o al menos decidir cómo debería manejarse si llegaran a ocurrir. Para ello es necesario saber por adelantado qué eventos pueden ocurrir, dichos “eventos” en este contexto son los modos de falla.

Lo ideal es poder identificar los modos de falla antes de que ocurran o al menos antes de que vuelvan a ocurrir. Por lo tanto, una vez que cada modo de falla ha sido identificado es posible considerar que sucede cuando ocurre, evaluar las consecuencias y decidir si debiera hacerse algo para anticipar, prever, detectar, corregir o hasta rediseñar.

Entonces, el proceso de selección de tareas de mantenimiento, y gran parte del manejo de estas tareas, se lleva a cabo al nivel del modo de falla.

2.1.5.3. **Categorías de Modos de Falla**

Como se mencionó anteriormente, mantenimiento significa asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que los usuarios quieren que haga, entonces un programa de mantenimiento global debe tener en cuenta todos los eventos que tienen posibilidad de amenazar esa funcionalidad. Dichos eventos o modos de falla pueden ser clasificados en tres grupos de la siguiente manera:

- Cuando la capacidad cae por debajo del funcionamiento deseado
- Cuando el funcionamiento deseado se eleva encima de la capacidad inicial
- Cuando desde el comienzo el activo físico no es capaz de hacer lo que se quiere.

Cada una de estas categorías es analizada a continuación.

2.1.5.3.1. *Capacidad decreciente*

La primera categoría de modos de falla cubre las situaciones en las que en un primer momento la capacidad está por arriba del funcionamiento deseado,

pero que luego decae cuando el activo físico es puesto en servicio, quedando por debajo del funcionamiento deseado, como se observa en la Figura 2.11.

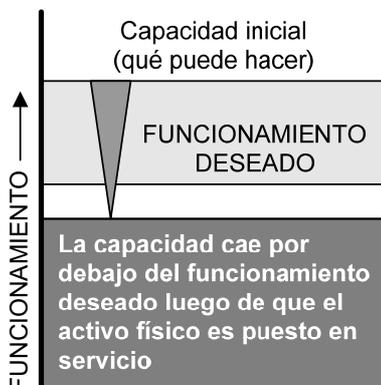


Figura 2.11. Modos de falla, Categoría 1

Las cinco causas principales de pérdida de capacidad son el deterioro, fallas de lubricación, polvo o suciedad, desarme y, errores humanos que reducen la capacidad.

2.1.5.3.1.1. Deterioro

Todo activo físico que cumple una función y que está en contacto con el mundo real está expuesto a esfuerzos diversos, los que causan que el activo se deteriore disminuyendo su capacidad. El deterioro cubre todas las formas de desgaste normal (fatiga, corrosión, abrasión, erosión, evaporación, degradación de aislantes, etc.). Estos modos de falla, deberían incluirse en una lista, cuando se considere que es razonablemente probable que ocurran.

2.1.5.3.1.2. Fallas de Lubricación

La lubricación se asocia con dos tipos de modos de falla. La primera tiene relación con la falta de lubricante, y la segunda se relaciona con una falla del lubricante mismo. El deterioro del lubricante se produce por fenómenos como el del fraccionamiento de las moléculas de aceite, oxidación de la base oleosa y agotamiento de los aditivos; en ciertos casos, el deterioro se agrava por la presencia de barros o de otros contaminantes. El lubricante también podría fallar al cumplir con sus funciones simplemente porque se está utilizando un lubricante

incorrecto. Si se considera que es probable que ocurra alguno o todos estos modos de falla, estos deben ser documentados y sujetos a un análisis detallado.

2.1.5.3.1.3. Polvo o Suciedad

La tierra o el polvo es una causa de falla muy común. Interfiere directamente con las máquinas haciendo que se atasquen, se obstruyan o se traben. Además es la causa principal de la falla de las funciones relacionadas con la apariencia de los activos, y causa problemas en la calidad de los productos. Por tanto, las fallas ocasionadas por suciedad deben estar registradas en el AMFE cuando se crea que es probable que causen cualquier falla funcional.

2.1.5.3.1.4. Desarme

Si los componentes se caen o salen de las máquinas, si los conjuntos o máquinas enteras se desarman, las consecuencias generalmente son serias, por lo que debe ser registrado el modo de falla relevante.

2.1.5.3.1.5. Errores humanos que reducen la capacidad

Se refiere a errores humanos que reducen la capacidad del proceso hasta que le es imposible funcionar según los requerimientos del usuario. Si se sabe que ocurren éstos modos de falla, deben ser registrados en el AMFE, para que luego puedan tomarse las decisiones adecuadas para el manejo de la falla. De cualquier modo, cuando se listan modos de falla causados por las personas, debe tenerse cuidado y listar *qué* es lo que estuvo mal y no *quién* lo causó; para no provocar que las personas pierdan de vista que con este análisis se busca evitar o resolver problemas y no atribuir culpas.

2.1.5.3.2. Aumento del Funcionamiento Deseado (o aumento del Esfuerzo Aplicado)

La segunda categoría de modos de falla ocurre cuando el funcionamiento deseado está dentro de la capacidad del activo físico cuando es puesto en servicio, pero luego aumenta hasta que queda fuera de su capacidad. Esto hace que el activo físico falle de una de estas dos maneras:

- El funcionamiento deseado aumenta hasta que el activo físico no puede responder a él, o

- El aumento del esfuerzo causa que se acelere el deterioro hasta el punto en que el activo físico se torna tan poco confiable que deja de ser útil.

Este fenómeno se ilustra en la Figura 2.12 y ocurre debido a cuatro razones, tres de las cuales implican algún tipo de error humano:

- Una sobrecarga deliberada constante
- Una sobrecarga no intencional constante
- Una sobrecarga no intencional repentina
- Procesamiento o material de empaque incorrecto.

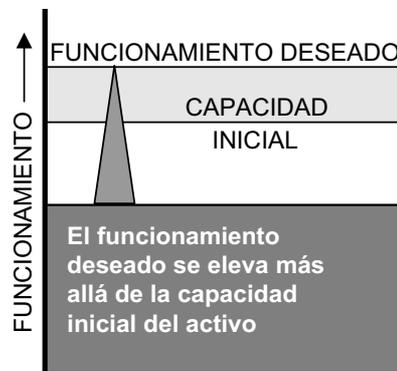


Figura 2.12. Modos de falla, Categoría 2

2.1.5.3.2.1. Sobrecarga deliberada constante

En muchas industrias, los usuarios frecuentemente caen en la tentación de acelerar el equipo en respuesta a un incremento en la demanda de los productos existentes; en otros casos, los activos adquiridos para un producto son utilizados para procesar un producto con características diferentes. De cualquier forma, las personas hacen esto porque creen que así podrán obtener más de sus instalaciones sin incrementar la inversión de capital. Esto podría llegar a ser cierto en el corto plazo; no obstante, esta solución traerá problemas en el largo plazo, especialmente cuando el aumento del esfuerzo comienza a acercarse o exceder las posibilidades del activo físico para tolerarlo. Las opciones serán modificar el activo o bajar las expectativas.

2.1.5.3.2.2. Sobrecarga no intencional constante

Muchas industrias responden a aumentos de la demanda por medio de programas de eliminación de cuellos de botella, lo que ocasiona que algunos pequeños subsistemas o componentes, para ajustarse a las nuevas condiciones, queden sobrecargados, teniendo a veces resultados catastróficos.

2.1.5.3.2.3. Sobrecarga no intencional repentina

Muchas fallas son causadas por un incremento repentino y generalmente no intencional del esfuerzo aplicado, que a su vez es causado por una operación incorrecta, ensamblaje incorrecto o por daños externos. Si se piensa que cualquiera de estos modos de falla tiene posibilidades de ocurrir en el contexto en cuestión, deberán ser incorporados al AMFE.

2.1.5.3.2.4. Materias primas y materiales de empaque incorrecto

Los procesos de manufactura frecuentemente sufren fallas funcionales causadas por materias primas que están fuera de especificación, o por materiales de empaques inadecuados o incompatibles.

2.1.5.3.3. Capacidad inicial

En la industria, surgen situaciones en las que el funcionamiento deseado está fuera del rango de capacidad inicial desde el comienzo, como lo muestra la Figura 2.13.



Figura 2.13. Modos de falla, Categoría 3

Este problema de incapacidad rara vez afecta al activo físico en su totalidad. Usualmente afecta sólo una o dos funciones o uno o dos componentes, pero estos puntos débiles perjudican la operación de toda la cadena. El primer

paso hacia la rectificación de un problema de diseño de esta naturaleza es listarlos como modos de falla en un AMFE.

2.1.5.4. **Detalle de los Modos de Falla**

Los modos de falla deben ser descritos con el detalle suficiente como para que sea posible seleccionar una estrategia adecuada de manejo de falla, pero no con tanto detalle como para que se pierda demasiado tiempo en el proceso de análisis, por lo que se concluye que:

Los modos de falla deben ser definidos con el detalle suficiente como para posibilitar la selección de una adecuada política de manejo de falla.

El nivel de detalle afecta profundamente la validez del AMFE y la cantidad de tiempo que se requiere para hacerlo. Si se hace con poco detalle y/o pocos modos de falla puede llevar a un análisis superficial y hasta peligroso; por el contrario, demasiados modos de falla o demasiado detalle hacen que el proceso RCM lleve mucho más tiempo que el necesario.

Para lograr un equilibrio correcto, los siguientes factores centrales necesitan ser tomados en cuenta:

2.1.5.4.1. *Causalidad*

Las causas de cualquier falla funcional pueden ser definidas casi a cualquier nivel de detalle, y pueden aplicarse diferentes niveles a distintas situaciones. La medida en que los modos de falla pueden ser descritos a diferentes niveles de detalle se muestra en el Anexo III, cuyos modos de falla aparecen en la Figura 2.10.

Como se puede observar existe una conexión entre el nivel de detalle y el número de modos de falla que se incluyen; esto es, cuanto más ahondemos en el AMFE, mayor será la cantidad de modos de falla que pueden incluirse en la lista. Por ejemplo, como se puede observar en el Anexo III, hay cinco modos de falla en el nivel 2, pero hay 64 en el nivel 6.

Este proceso podría continuar descendiendo ilimitadamente, mucho más allá del punto en que la organización tiene control sobre los modos de falla. Por

esto, el nivel al que debería ser identificado un modo de falla es aquel en el cual es posible identificar una política apropiada para el manejo de la falla. Evidentemente, para poder detenerse en un nivel apropiado, las personas que participan de este tipo de análisis necesitan conocer la totalidad de las opciones de políticas de manejo de fallas.

2.1.5.4.2. Probabilidad

Al preparar un AMFE, se debe decidir constantemente sobre qué modos de falla son tan poco probables que ocurran que pueden ser ignorados sin peligro. No se trata de registrar absolutamente todas las posibilidades de falla sin importar la probabilidad que tienen de ocurrir.

Cuando se listan modos de falla, no debe tratarse de listar todos y cada uno de ellos ignorando la probabilidad de ocurrir que tiene cada uno.

Es decir, sólo deben ser listados los modos de falla que tienen posibilidades razonables de ocurrir en ese contexto determinado. Una lista de modos de falla “razonablemente probables” debería incluir lo siguiente:

- *Fallas que han ocurrido antes en el mismo activo físico o en activos similares*
- *Modos de falla que ya son objeto de rutinas de mantenimiento proactivo, y que ocurrirían si no se hiciera mantenimiento proactivo*
- *Cualquier otro modo de falla que no haya ocurrido todavía, pero que tiene posibilidades reales de suceder.*

2.1.5.4.3. Consecuencias

Si las consecuencias pueden ser realmente severas, entonces fallas que aún son menos probables *deben* registrarse y ser sometidas a análisis.

2.1.5.4.4. Causas versus Efecto

Cuando se listan modos de fallas debe tenerse cuidado de no confundir causas con efectos. Este es un error sutil en el que suelen caer las personas que son nuevas en el proceso de RCM.

2.1.5.4.5. *Modos de falla y el contexto operacional*

Se ha visto como las funciones y las fallas funcionales de cualquier ítem están influenciadas por su contexto operacional. Esto también es valedero para los modos de falla en términos de causas, probabilidad y consecuencias. El contexto operacional afecta también los niveles de análisis de la misma manera que las causas y consecuencias de las fallas.

2.1.5.5. **Efectos de Falla**

El cuarto paso en el proceso de revisión RCM consiste en hacer una lista de lo que de hecho sucede al producirse cada modo de falla, esto se denomina *efectos de falla*.

Los efectos de la falla describen qué pasa cuando ocurre un modo de falla.

Nótese que *efecto de falla* no es lo mismo que *consecuencia de falla*. Un efecto de falla responde a la pregunta ¿Qué ocurre?, mientras que una consecuencia de falla responde a la pregunta ¿Qué importancia tiene?

La descripción de los efectos debe incluir toda la información necesaria para ayudar en la evaluación de las consecuencias de las fallas. Concretamente, al describir los efectos de una falla, debe hacerse constar lo siguiente:

- La evidencia (si la hubiere) de que se ha producido una falla
- Las maneras (si las hubiere) en que la falla supone una amenaza para la seguridad o el medio ambiente
- Las maneras (si las hubiere) en que afecta a la producción o las operaciones
- Los daños físicos (si los hubiere) causados por la falla
- Qué debe hacerse para reparar la falla.

Los efectos de las fallas deben describirse como si no se estuviera haciendo nada para impedirlos.

2.1.5.5.1. Evidencia de Falla

Los efectos de las fallas deben describirse de tal forma que permitan a los analistas de RCM decidir si, en circunstancias normales, será evidente para los operarios la pérdida de función causada por ese modo de falla actuando por sí solo. Así mismo la descripción debe indicar si la falla va acompañada o precedida por efectos físicos obvios, tales como ruidos fuertes, incendio, humo, fugas de vapor, olores extraños o manchas de líquido en el piso. También debe indicar si la máquina se detiene como consecuencia de la falla.

Una descripción promedio de un efecto de falla generalmente es de 20 a 60 palabras, y en la cual no debe prejugarse la evaluación de las consecuencias de las fallas usando palabras como “oculto” o “evidente”.

2.1.5.5.2. Riesgos para la Seguridad y el Medio Ambiente

Si existe una posibilidad de que alguien se lesione o muera como consecuencia directa de una falla, o que se infrinja una normativa o reglamento del medio ambiente, la redacción del efecto de la falla debe explicar cómo esto podría ocurrir. Este punto no hace referencia solamente a posibles amenazas al propio personal (operadores y personal de mantenimiento), sino que también se refiere a las amenazas sobre la seguridad de los consumidores y de la comunidad en su conjunto.

2.1.5.5.3. Daños Secundarios y Efectos en la Producción

La descripción de los efectos de la falla debe aportar la máxima claridad posible para determinar cuáles son las consecuencias operacionales y no operacionales de la misma. Para hacer esto, debe indicar cómo y durante cuánto tiempo queda afectada la producción (si es que resulta afectada). Generalmente esto tiene que ver con el tiempo de parada de máquina ocasionada por cada falla.

En este contexto, el tiempo de parada de máquina es el tiempo total durante el cual la máquina probablemente permanece fuera de servicio en condiciones normales, desde el momento en que se produce la falla hasta el momento en que la máquina nuevamente se encuentra totalmente operacional, como se puede observar en la Figura 2.14:



Figura 2.14. Tiempo de parada de máquina vs. tiempo de reparación

El tiempo de parada de la máquina o “tiempo muerto”, como se puede observar, puede variar mucho entre distintas ocasiones en que se dé la misma falla. Las consecuencias más serias generalmente son causadas por las paradas más largas, por lo que, el tiempo muerto que se registra en la hoja de información debe basarse en el “peor caso típico”.

Además del tiempo muerto, se debe listar cualquier otra forma mediante la cual la falla podría tener un efecto significativo sobre la capacidad operacional:

- Cómo y cuánto afecta la calidad del producto y el servicio al cliente, y de ser así, qué penalidades financieras origina
- Si origina detención de cualquier otro equipo o actividad (o disminuye la velocidad)
- Si la falla lleva un incremento del costo operativo total además del costo directo de reparación (como por ejemplo costos de energía más altos)
- Qué daños secundarios (si existe alguno) son causados por la falla.

2.1.5.5.4. Acción Correctiva

Los efectos de falla también deben indicar qué debe hacerse para reparar la falla. Esto debe incluirse cuando se indica el tiempo muerto, como un promedio del mismo.

2.1.5.6. Fuentes de Información acerca de Modos y Efectos

Al considerar dónde obtener la información necesaria para armar un AMFE completo, debe darse tanto énfasis a lo que podría ocurrir como a lo que ha ocurrido. Las fuentes de información más frecuentes son las siguientes:

2.1.5.6.1. El fabricante o proveedor del equipo

Al llevarse a cabo un AMFE, la primer fuente de información que nos viene a la mente es el fabricante; sobre todo en el caso de equipos nuevos. Cuando se considera esta fuente hay que tener muy en cuenta que los fabricantes generalmente tienen poco acceso a la información sobre el contexto operacional del equipo, los estándares de funcionamiento deseado, las consecuencias de la falla y las habilidades de operadores y personal de mantenimiento del usuario.

2.1.5.6.2. Listas genéricas de modos de falla

Las listas de modos de falla “genéricas” son listas de modos de falla, o a veces un AMFE completo, preparado por terceros. Pueden cubrir sistemas enteros, aunque frecuentemente cubren sólo un activo físico o un solo componente. Estas listas genéricas a veces son consideradas como una manera de acelerar o “abreviar” esta parte del proceso de desarrollo del programa de mantenimiento. Deben ser abordadas con precaución y utilizarse únicamente como un complemento para un AMFE específico, debido a los siguientes motivos:

- Puede ser que el nivel de análisis no sea el apropiado
- El contexto operacional puede ser diferente
- Los parámetros de funcionamiento pueden cambiar.

2.1.5.6.3. Otros usuarios de la misma maquinaria

Otros usuarios de máquinas iguales son una fuente de información obvia y muy valiosa acerca de lo que puede fallar con activos físicos de uso común, siempre que las presiones competitivas permitan el intercambio de información. Sin embargo deben tomarse en cuenta los mismos comentarios anteriores acerca de los peligros de la información genérica al contemplar estas fuentes de información.

2.1.5.6.4. Registros de antecedentes técnicos

Los registros de antecedentes técnicos también pueden ser una valiosa fuente de información. Sin embargo, deben ser tratados con cautela por las siguientes razones:

- Por lo general son incompletos
- A menudo describen lo que fue hecho para reparar la falla en vez de lo que causó
- No describen fallas que aún no han ocurrido
- Generalmente describen modos de falla que en realidad son efecto de alguna otra falla.

2.1.5.6.5. Las personas que operan y mantienen el equipo

En la mayoría de los casos, la mejor fuente de información para preparar un AMFE son las personas que día a día operan y mantienen el equipo. Ellos son los que más conocen el funcionamiento del equipo, acerca de qué puede estar andando mal, qué importancia tiene cada falla y qué debe hacerse para repararla. Y si no lo saben, son ellos quienes tienen más razones para averiguarlo.

La mejor manera de capturar y recolectar éstos conocimientos es haciendo que participen formalmente en la preparación del AMFE como parte del proceso general de RCM. La forma más eficiente de hacer esto es en una serie de reuniones bajo la guía de un facilitador entrenado adecuadamente.

2.1.5.7. Niveles de Análisis y la Hoja de Información

Por lo general, pueden seleccionarse niveles altos (menor detalle) si el componente o subsistema admiten trabajar a rotura (run to failure) o bien realizar tareas de búsqueda de falla, mientras que los niveles más bajos (más detalle) debe seleccionarse si el modo de falla puede estar sujeto a algún mantenimiento proactivo.

2.1.5.7.1. Nivel de Análisis

Para definir el nivel de análisis al cual se llevará a cabo el proceso, es necesario definir exactamente cuál es el “activo físico” al que se le aplicará el proceso. Tomando en cuenta que un análisis que se lleva a cabo a un alto nivel termina siendo muy superficial, mientras que uno hecho a un nivel muy bajo se vuelve inmanejable. Las implicaciones de realizar el análisis en diferentes niveles son las siguientes:

2.1.5.7.1.1. Comenzando en un nivel bajo

Si se lleva a cabo un análisis a este nivel, pueden aparecer los siguientes problemas:

- Cuánto más bajo se vaya en la jerarquía, más difícil se vuelve conceptualizar y definir estándares de funcionamiento
- En un nivel bajo se vuelve igualmente difícil el visualizar y por ende analizar las consecuencias de la falla
- Cuánto más bajo sea el nivel de análisis más difícil se vuelve definir que componentes conforman cada sistema
- Algunos modos de falla pueden causar que muchos subconjuntos dejen de funcionar simultáneamente
- Se puede volver muy difícil manejar los ciclos de control y protección en un nivel de análisis muy bajo.

Por lo general el AMFE se lleva a cabo a un nivel muy bajo porque se cree que hay una correlación entre el nivel en el cual se identifica modos de falla y el nivel en el que debe hacerse el AMFE. De hecho, esto no es así. El nivel en el cual se puede identificar los modos de falla es independiente del nivel en el que se hace el análisis.

2.1.5.7.1.2. Comenzando desde arriba

Las ventajas principales de comenzar el análisis de esta manera son las siguientes:

- Las funciones y las expectativas son mucho más fáciles de definir.
- Las consecuencias de las fallas son mucho más fáciles de evaluar.
- Es mucho más fácil identificar y analizar circuitos de control y circuitos en general.
- Hay menos repetición de funciones y de modos de falla.
- No es necesario hacer una hoja de información nueva para cada subsistema nuevo.

No obstante, la principal desventaja de realizar el análisis en este nivel es que tratar de listar los modos de falla seguramente será una labor hartamente difícil, puesto que su número aumenta enormemente a dicho nivel.

2.1.5.7.1.3. Niveles intermedios

Los problemas asociados a los análisis hechos a altos y bajos niveles hacen ver que sería razonable llevar a cabo el análisis a un nivel intermedio. Una buena regla general (especialmente para gente que recién se inicia en RCM) es la de llevar a cabo el análisis a uno o dos niveles más altos de lo que en un principio se ve como razonable. Con un poco de práctica (especialmente sobre lo que significa “a un nivel en el cual sea posible identificar una política de administración de fallas adecuada”), se vuelve intuitivamente obvio cuál es el nivel más adecuado en el cual debe ser llevado a cabo un análisis.

2.1.5.7.2. Cómo deben Documentarse los Modos de Falla y sus Efectos

Una vez establecido el nivel de análisis, se debe decidir qué grado de detalle se necesita para definir cada modo de falla encuadrado en dicho análisis. No hay razón técnica por la cual no puedan listarse todos los modos de falla (junto con sus efectos) al nivel que permita seleccionar una política de manejo de fallas adecuada. Pero, aún a niveles intermedios, a veces se generan demasiados modos de falla por cada función, especialmente para funciones primarias; lo cual ocurre, por lo general, cuando el activo tiene subconjuntos complejos que pueden tener muchos modos de falla. Estos subconjuntos pueden manejarse de las siguientes cuatro maneras diferentes, dependiendo del contexto y de sus consecuencias.

2.1.5.7.2.1. Opción 1

Listar de manera individual todos los modos de falla de ocurrencia probable del subconjunto como parte del análisis principal. Por lo general, los modos de falla que afectan a un subconjunto pueden incorporarse en un nivel de análisis más alto si el subconjunto no tiene más de seis modos de falla posibles a ser considerados y que puedan causar cualquier falla funcional del sistema del nivel superior.

2.1.5.7.2.2. Opción 2

Listar la falla del subconjunto como un modo de falla simple en la hoja de información para empezar, luego confeccionar una nueva hoja de información para analizar las funciones, fallas funcionales, modos de falla y efectos del subconjunto como un ejercicio por separado. Por lo general es conveniente tratar a los subconjuntos de esta manera si tienen más de 10 modos de falla que puedan causar cualquier falla funcional del sistema principal.

Si existen entre 7 y 9 modos de falla por falla funcional, puede usarse la opción 1 ó 2 teniendo en cuenta que un análisis por separado implica más análisis, pero menos modos de falla por análisis.

2.1.5.7.2.3. Opción 3

Listar la falla del subconjunto en la hoja de información como un modo de falla simple – en otras palabras, a un nivel equivalente al nivel 1 ó 2 del Anexo III – lo cual sólo puede hacerse para un componente o subconjunto que tenga las siguientes características:

- Cuando falla no esté sujeto a un diagnóstico detallado ni a una rutina de reparación, pero puede ser reemplazado fácilmente para luego ser descartado o reparado
- Es pequeño pero complejo
- No tiene ningún modo de falla dominante
- No es susceptible a ninguna forma de mantenimiento preventivo.

2.1.5.7.2.4. Opción 4

Listar los modos de falla mediante una combinación de las opciones 1 y 3. Esto es recomendable cuando un subconjunto podría sufrir uno o dos modos de falla dominantes que sean evitables, y algunos modos de falla menos probables que por su frecuencia y/o sus consecuencias no convenga prevenir.

2.1.5.7.2.5. Servicios

La falla de suministros (electricidad, agua, vapor, aire comprimido, gas, vacío, etc.) se trata como un modo de falla simple desde el punto de vista del

activo que los recibe, ya que un análisis detallado de estas fallas está fuera del activo en cuestión. Estas fallas serán luego analizadas en detalle cuando se trate el servicio como un todo.

2.1.5.7.2.6. Hoja de Información completa

Los efectos de falla se registran en la última columna de la hoja de Información.

2.1.6. CONSECUENCIAS DE FALLA

Mediante el tratamiento de la quinta pregunta del proceso RCM, se demuestra cómo este proceso provee un marco estratégico de trabajo completo para manejar las fallas.

5. *¿En qué sentido es importante cada falla?*

2.1.6.1. **Técnicamente Factible y Merecer la Pena**

Cada vez que ocurre una falla en un activo físico, de alguna manera afecta a la organización que lo utiliza. La naturaleza y gravedad de estos efectos definen las consecuencias de la falla. Es decir, definen la manera en que los dueños y los usuarios de los activos creerán que cada falla es importante. Entonces podemos decir que, si podemos reducir los efectos de una falla en términos de frecuencia y/o severidad, estaremos reduciendo sus consecuencias.

Este enfoque sobre las consecuencias hace que RCM comience el proceso de selección de tareas asignando los efectos a cada modo de falla y clasificándolos dentro de una de las categorías definidas. El próximo paso es encontrar una tarea proactiva que sea físicamente posible de realizar y que reduzca las consecuencias de la falla al punto que sea tolerable para el dueño o el usuario del activo. Si podemos encontrar dicha tarea, se dice que es **técnicamente factible**.

Si una tarea es técnicamente factible, podemos avanzar entonces al siguiente paso en el cual nos preguntaremos si realmente la tarea reduce las consecuencias de la falla a un punto que justifique los costos directos e indirectos de hacerla. Si la respuesta es sí, diremos que la tarea **merece la pena**.

Una tarea proactiva merece la pena si reduce las consecuencias del modo de falla asociado a un grado tal que justifique los costos directos e indirectos de hacerla.

2.1.6.2. Funciones Ocultas y Evidentes

Todo activo tiene más de una, y a veces docenas de funciones. Cuando la mayoría de estas funciones fallan, se hace inevitablemente evidente que ha ocurrido una falla; algunas de las cuales activan luces de advertencia, alarmas sonoras o ambas, otras hacen que se paren las máquinas o que se interrumpa alguna otra parte del proceso, otras dan lugar a problemas de calidad del producto, o a un incremento en el consumo de energía, y otras van acompañadas de efectos físicos obvios tales como ruidos fuertes, escapes de vapor, olores extraños o manchas de líquido en el piso. Las fallas de este tipo se califican de evidentes, lo cual lleva a la siguiente definición de una función evidente:

Una función evidente es aquella cuya falla eventualmente e inevitablemente se hará evidente por sí sola a los operadores en circunstancias normales.

En otras ocasiones, algunas fallas ocurren de tal forma que nadie sabe que el elemento se ha averiado a menos que se produzca alguna otra falla, lo cual lleva a la siguiente definición de una función oculta:

Una función oculta es aquella cuya falla no se hará evidente a los operarios bajo circunstancias normales, si se produce por sí sola.

El primer paso en el proceso RCM es separar las funciones ocultas de las evidentes, porque las ocultas necesitan de un manejo especial.

2.1.6.2.1. Categorías de Fallas Evidentes:

Las fallas evidentes se clasifican en tres categorías de importancia decreciente:

- Consecuencias para la seguridad y el medio ambiente
- Consecuencias operacionales
- Consecuencias no operacionales.

2.1.6.3. Consecuencias para la Seguridad y el Medio Ambiente

2.1.6.3.1. La Seguridad ante todo

El proceso de RCM considera primero las implicaciones ambientales y para la seguridad de cada modo de falla evidente. En cierto sentido, la seguridad se refiere a la seguridad de los individuos en su lugar de trabajo. Concretamente, RCM pregunta si alguien podría resultar lesionado o muerto, como resultado directo del modo de falla en sí o bien como resultado de otro daño que pudiera ser ocasionado por la falla.

Un modo de falla tiene consecuencias para la seguridad si causa una pérdida de función u otros daños que pudieran lesionar o matar a alguien.

En otro nivel, la “seguridad” se refiere a la integridad o bienestar de la sociedad en general. Hoy en día las fallas que afectan a la sociedad tienden a calificarse como problemas “ambientales”. De hecho estas expectativas de la sociedad se expresan en normativas ambientales; de modo que:

Un modo de falla tiene consecuencias ambientales si causa una pérdida de función u otros daños que pudieran conducir a la infracción de cualquier normativa o reglamento ambiental conocido.

2.1.6.3.2. La Cuestión del Riesgo

Aunque la mayoría de las personas quisieran vivir en un medio en el que no exista posibilidad alguna de muerte o daño físico, por lo general se acepta que hay un elemento de riesgo en todo lo que se hace.

La valoración del riesgo consta de tres elementos que se los analiza a través de las siguientes preguntas:

¿Qué podría pasar si ocurriese la falla?

Deben tenerse en cuenta dos cosas al considerar lo que pudiera pasar si ocurriese una falla: *qué sucede realmente*, y si como consecuencia *es probable que alguien resulte lastimado o muerto*.

Lo que sucede realmente si ocurre cualquier modo de falla debe ser registrado en la hoja de trabajo de información de RCM como efectos de falla. El hecho de que éstos efectos *podrían* matar o herir a alguien no significa necesariamente que lo harán cada vez que ocurran, algunos hasta podrían ocurrir con frecuencia y sin embargo no matar a nadie. Pero, el tema no es si dichas consecuencias son inevitables, sino si son posibles.

¿Qué probabilidad hay de que ocurra una falla?

Como se mencionó anteriormente, sólo deberían incluirse en la hoja de información de RCM los modos de falla que tienen posibilidades razonables de ocurrir en el contexto en cuestión. En consecuencia, si la Hoja de Trabajo de Información ha sido preparada sobre una base realista, el mero hecho de que el modo de falla haya sido registrado sugiere que hay alguna posibilidad de que pueda ocurrir, y por lo tanto que debería ser sometido a un análisis posterior.

¿Es tolerable el riesgo?

Uno de los aspectos más difíciles de la administración de seguridad es la medida en que varían las expectativas de qué es tolerable, de individuo a individuo y de grupo a grupo. Muchos factores influyen sobre esas creencias, pero el más dominante es *el grado de control que un individuo cree tener sobre la situación*. Las personas casi siempre toleran un mayor nivel de riesgo cuando creen que tienen control personal sobre la situación que cuando creen que la situación está fuera de su control, como se puede observar en la Figura 2.15.

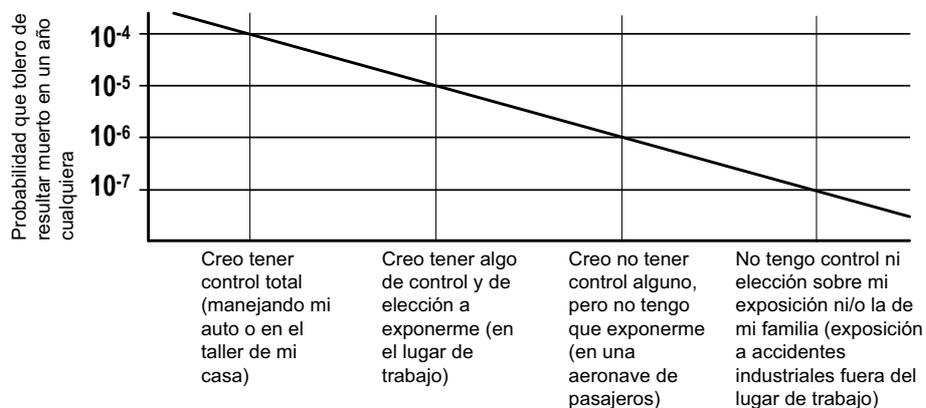


Figura 2.15. Aceptabilidad de riesgo fatal
(Moubray, 2004)

Algunos factores que ayudan a decidir lo que es tolerable son: valores individuales, valores de industria, el efecto sobre las “*generaciones futuras*” y el conocimiento. Por lo que es imposible especificar un estándar de tolerabilidad que sea absoluto y objetivo para cualquier riesgo. Lo cual sugiere que la tolerabilidad de cualquier riesgo sólo puede ser evaluada partiendo de la base de que es al mismo tiempo relativa y subjetiva.

¿Quién debería evaluar los riesgos?

Una evaluación de riesgo satisfactoria sólo puede ser realizada por un grupo. En la medida de lo posible, el grupo debe representar a las personas que probablemente tengan un claro entendimiento del mecanismo de falla, los efectos de falla, la probabilidad de que las fallas ocurran, y de las posibles medidas que pueden ser tomadas para anticiparla o prevenirla. El grupo también debe incluir a las personas que tengan un punto de vista legítimo sobre la tolerabilidad de los riesgos, esto es, representantes de las probables víctimas y de la gerencia.

2.1.6.3.3. Seguridad y Mantenimiento Proactivo

Si una falla pudiese afectar la seguridad o el medio ambiente, el proceso de RCM estipula que debemos intentar prevenirla. Lo expresado anteriormente sugiere que:

Para modos de falla que tienen consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, sólo merece la pena realizar una tarea proactiva si reduce la probabilidad de la falla a un nivel tolerablemente bajo.

Si no pudiese hallarse una tarea proactiva que logre éste objetivo, satisfaciendo al grupo que está haciendo el análisis, estaríamos tratando con un riesgo ambiental o para la seguridad que no puede ser adecuadamente anticipado o prevenido. Esto significa que algo debe ser *cambiado* para hacer que el sistema sea seguro, lo cual podría ser el activo físico mismo, un proceso, o un procedimiento operativo.

Por tanto, el proceso de decisión para modos de falla que tienen consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, puede ser resumido como lo muestra la Figura 2.16:

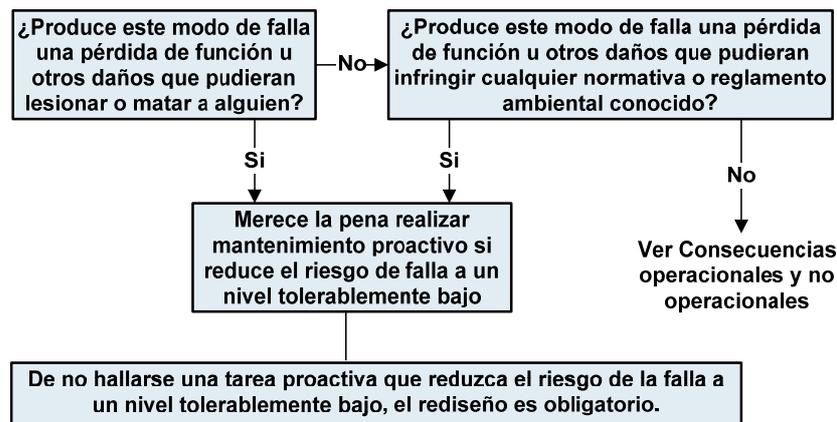


Figura 2.16. Identificando y desarrollando una estrategia de mantenimiento para una falla que afecta la seguridad o el medio ambiente

2.1.6.4. Consecuencias Operacionales

2.1.6.4.1. *Cómo las Fallas Afectan a las Operaciones*

La función primaria de la mayoría de los equipos en la industria está vinculada de algún modo con la necesidad de producir ingresos o de apoyar alguna actividad económica. Las fallas que afectan las funciones primarias de estos activos físicos afectan la capacidad de generación de ingresos de la compañía. La magnitud de estos efectos depende de la carga de máquina y de la disponibilidad de alternativas. Sin embargo en la mayoría de los casos los efectos son mayores que el costo de reparar la falla.

En general las fallas afectan las operaciones de cuatro maneras: afectan al volumen de producción total, la calidad del producto, el servicio al cliente y, al incremento del costo operacional sumado al costo directo de la reparación.

La severidad de este tipo de consecuencias lleva a que, si una falla evidente no representa una amenaza a la seguridad o el medio ambiente, el proceso RCM se enfoque en las consecuencias operacionales de la falla.

Una falla tiene consecuencias operacionales si tiene un efecto adverso directo sobre la capacidad operacional.

2.1.6.4.2. *Evitando Consecuencias Operacionales*

El efecto global de cualquier modo de falla que tiene consecuencias operacionales depende de dos factores:

- Cuánto cuesta la falla cada vez que ocurre, en términos de su efecto sobre la capacidad operacional, más el costo de la reparación
- Con qué frecuencia ocurre.

Por lo que, para evaluar la trascendencia económica de estas fallas, debemos evaluar cuánto pueden costar *a lo largo de un período de tiempo*. Entonces si una falla tiene consecuencias operacionales, el criterio para decidir si merece la pena realizar una tarea proactiva es económico.

Para modos de falla con consecuencias operacionales, merece la pena realizar una tarea proactiva si a lo largo de un período de tiempo, cuesta menos que el costo de las consecuencias operacionales más el costo de reparar la falla que pretende evitar.

El proceso de decisión para fallas con consecuencias operacionales puede ser resumido como lo muestra la Figura 2.17:

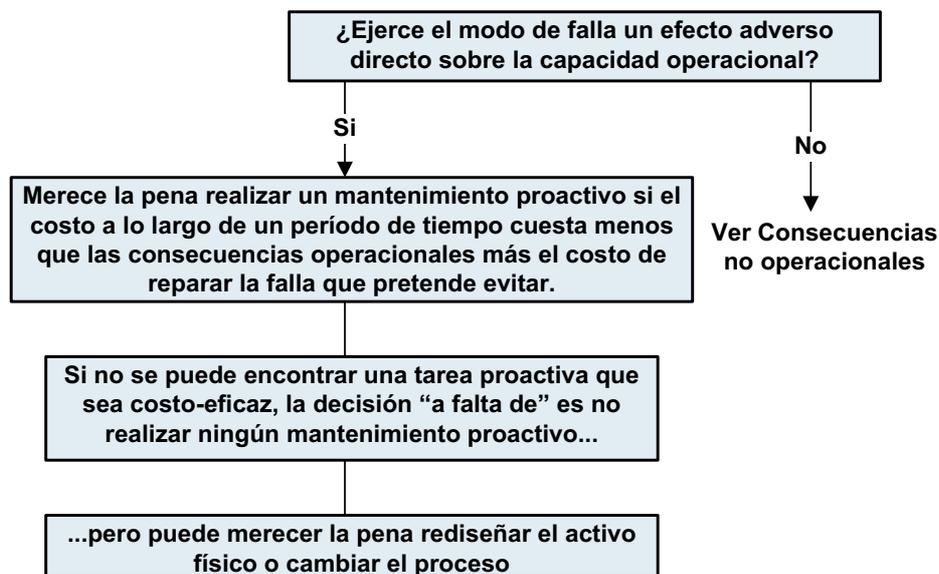


Figura 2.17. Identificando y desarrollando una estrategia de mantenimiento para una falla que tiene consecuencias operacionales

Téngase en cuenta que este análisis debe ser realizado para cada modo de falla individualmente y no para el activo como un todo, puesto que cada tarea proactiva se diseña para prevenir un modo de falla específico.

2.1.6.5. Consecuencias No Operacionales.

Las consecuencias de una falla evidente que no ejerce un efecto adverso directo para la seguridad, el medio ambiente, o la capacidad operacional, son clasificadas como *no operacionales*. Las únicas consecuencias asociadas con estas fallas son los costos directos de reparación, con lo que estas consecuencias también son *económicas*.

Para modos de falla con consecuencias no operacionales, merece la pena realizar tareas proactivas si, en un período de tiempo, cuesta menos que el costo de reparar las fallas que pretende prevenir.

Es necesario considerar adicionalmente los dos siguientes puntos cuando se analizan fallas con consecuencias no operacionales:

- *Daños secundarios*: ciertos modos de falla pueden causar si no se los evita o previene, un daño secundario considerable, lo que se suma a sus costos de reparación
- *Funciones protegidas*: sólo podríamos decir que una falla no tiene consecuencias operacionales porque dispone de un dispositivo redundante o de reserva, si es razonable asumir que el dispositivo de protección será funcional cuando la falla ocurra.

2.1.6.6. Consecuencias de Fallas Ocultas

Los dispositivos de protección son cada vez más utilizados para intentar eliminar (o por lo menos reducir) las consecuencias de las fallas evidentes. La existencia de dichos dispositivos crea dos tipos de posibilidades de falla, dependiendo si el dispositivo de seguridad tiene seguridad inherente o no.

2.1.6.6.1. Dispositivos de protección con seguridad inherente

En RCM, *seguridad inherente* significa que la falla del dispositivo por sí sola se hará evidente para el grupo de operarios bajo circunstancias normales.

En el contexto de RCM, un dispositivo con seguridad inherente es aquel cuya falla se vuelve evidente por sí misma al personal de operación en circunstancias normales.

Por tanto, en un sistema que incluye un dispositivo con seguridad inherente, hay tres posibilidades de falla en cualquier período. La primera posibilidad es que *no falle ninguno de los dispositivos*, en este caso todo se desarrolla normalmente. La segunda posibilidad es que *la función protegida falle antes que el dispositivo de seguridad*, en este caso el dispositivo de seguridad realiza su función asignada y, dependiendo de la naturaleza de la protección, las consecuencias de la falla de la función protegida son reducidas o eliminadas. La tercera posibilidad es que *el dispositivo de seguridad falle antes que la función protegida*, lo cual sería evidente, por tanto la posibilidad de que el dispositivo protegido falle mientras el dispositivo de seguridad se encuentra averiado puede casi ser eliminada, o bien apagando la función protegida o incorporando una protección alternativa mientras se repara el dispositivo de seguridad fallado.

Esto significa que las consecuencias de la falla de un dispositivo de seguridad con seguridad inherente usualmente entran dentro de las categorías de “operacional” o “no operacional”.

La secuencia de estos eventos se resume en la Figura 2.18.

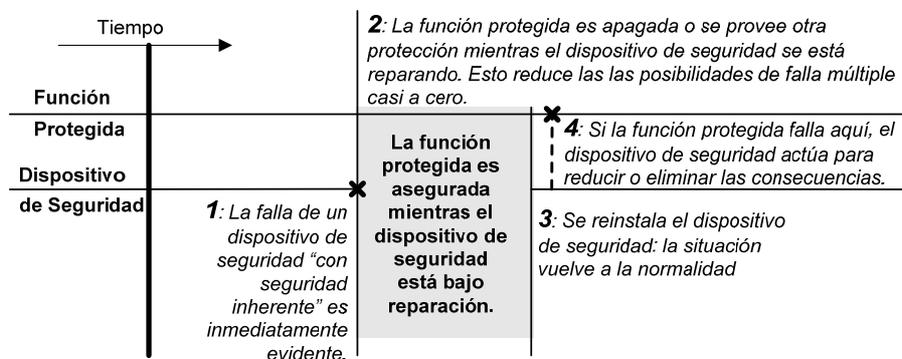


Figura 2.18. Falla de un dispositivo de seguridad con “seguridad inherente”

2.1.6.6.2. Dispositivos de seguridad que no cuentan con seguridad inherente

En un sistema que contiene un dispositivo de seguridad que no cuenta con seguridad inherente, existen cuatro posibilidades de falla en cualquier período dado.

La primera es cuando ninguno de los dispositivos falla. La segunda posibilidad es que falle la función protegida en un momento en que el dispositivo

de seguridad está funcionando. La tercera posibilidad es que falle el dispositivo de seguridad mientras la función protegida sigue funcionando.

Bajo estas circunstancias se podría preguntar lo siguiente:

¿Será evidente para los operadores la pérdida de función originada por este modo de falla por sí solo bajo circunstancias normales?

Si la respuesta a esta pregunta es no, entonces se trata de un **modo de falla oculto**.

La cuarta posibilidad durante un ciclo cualquiera es que el dispositivo de seguridad falle, y luego falle la función protegida mientras el dispositivo de seguridad está en estado de falla. Esta situación es conocida como **falla múltiple**.

Sólo ocurre una falla múltiple si una función protegida falla mientras que el dispositivo de protección se encuentra en estado de falla.

La secuencia de eventos que lleva a una falla múltiple es resumida en la Figura 2.19.

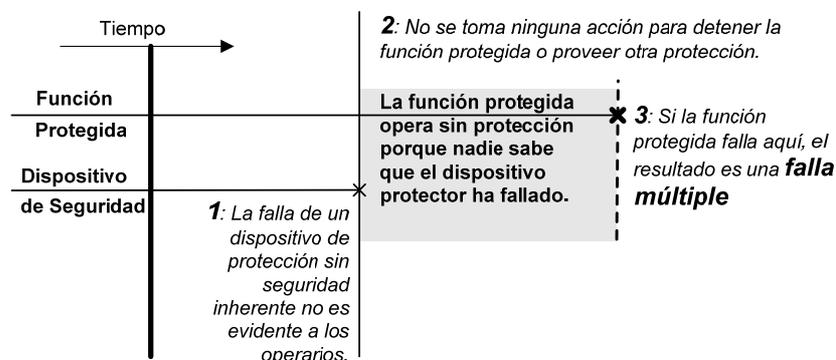


Figura 2.19. Falla de un dispositivo de protección cuya función es oculta

Dado que la prevención de las fallas trata principalmente de evitar las consecuencias de la falla, *el objetivo de un programa de mantenimiento para una función oculta es prevenir la falla múltiple asociada, o al menos reducir las probabilidades de que ocurra.*

En la práctica, la probabilidad que se considera tolerable para cualquier falla múltiple depende de sus consecuencias. En la gran mayoría de los casos *la*

evaluación debe ser realizada por los usuarios del activo físico. Estas consecuencias varían enormemente de un sistema a otro; por lo que, lo que se estima tolerable varía con la misma amplitud.

2.1.6.6.3. Mantenimiento de Rutina y Funciones Ocultas

En un sistema que incorpora un dispositivo sin seguridad inherente, la probabilidad de una falla múltiple puede ser reducida de la siguiente manera:

- Reduciendo la frecuencia de falla de la función protegida
 - ✓ Haciendo algún tipo de mantenimiento proactivo
 - ✓ Cambiando la manera en que se opera la función protegida
 - ✓ Cambiando el diseño de la función protegida
- Incrementando la disponibilidad del dispositivo de protección
 - ✓ Haciendo algún tipo de mantenimiento proactivo
 - ✓ Verificando periódicamente si el dispositivo de protección ha fallado
 - ✓ Modificando el dispositivo de protección

Considerando que la probabilidad de una falla múltiple está en parte basada en la frecuencia de falla de la función protegida, esta podría, casi con certeza, ser reducida mejorando el mantenimiento o la operación del dispositivo protegido o, como último recurso, cambiando el diseño.

Por otro lado, es poco probable que cualquier tarea proactiva pueda lograr que cualquier función alcance una disponibilidad de 100% indefinidamente. Lo que debe hacer, sin embargo, es dar la disponibilidad necesaria para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable. Por lo que se puede concluir que:

Para fallas ocultas, merece la pena realizar una tarea proactiva si asegura la disponibilidad necesaria para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable.

2.1.6.6.4. Funciones Ocultas: El Proceso de Decisión

La Figura 2.20 resume el desarrollo de una estrategia de mantenimiento para funciones ocultas:

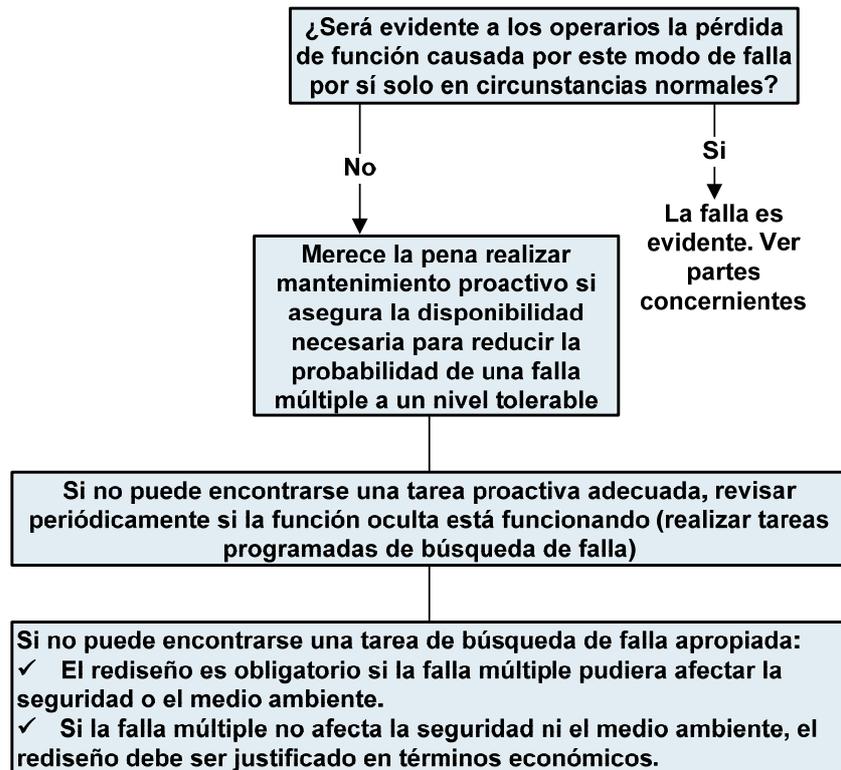


Figura 2.20. Identificando y desarrollando una estrategia de mantenimiento para una función oculta

Cuando se contesta la primera pregunta de la figura anterior, además se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La disposición entre fallas funcionales y modos de falla
- El tiempo
- Las funciones primarias y secundarias de los dispositivos de protección
- Qué se entiende exactamente por “operarios”
- Qué son “circunstancias normales”
- Dispositivos con “seguridad inherente”

A continuación, la Figura 2.21 muestra los pasos a seguir durante una evaluación de las consecuencias de una falla.

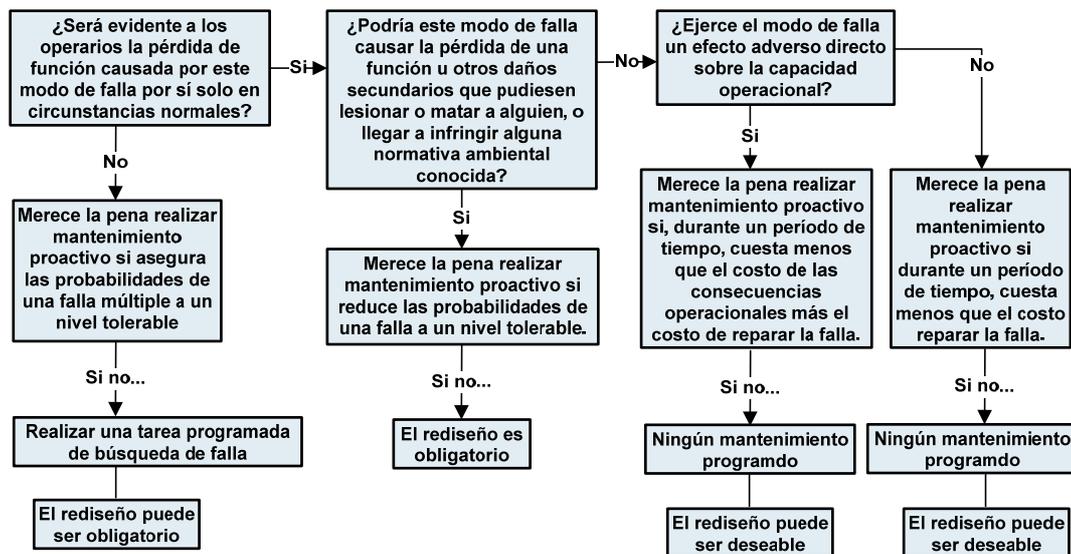


Figura 2.21. La evaluación de las consecuencias de falla

2.1.7. TAREAS DE MANTENIMIENTO

Las acciones que pueden tomarse para manejar las fallas pueden dividirse en las siguientes dos categorías:

- **Tareas proactivas:** estas tareas se llevan a cabo antes que ocurra una falla, con el objetivo de prevenir que el componente llegue a un estado de falla. Abarcan lo que comúnmente se denomina mantenimiento “preventivo” y mantenimiento “predictivo”, aunque RCM utiliza los términos *reacondicionamiento cíclico*, *sustitución cíclica*, y *mantenimiento a condición*
- **Acciones a falta de:** estas tratan con el estado de falla, y son elegidas cuando no es posible identificar una tarea proactiva efectiva. Las acciones “a falta de” incluyen *búsqueda de falla*, *rediseño*, y *mantenimiento a rotura*.

Estas dos categorías corresponden a la sexta y séptima pregunta del proceso de decisión básico de RCM:

6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?

7. ¿Qué debe hacerse sino se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Los numerales 2.1.7.1 y 2.1.7.2 se ocupan de la sexta pregunta.

2.1.7.1. Mantenimiento Proactivo: Tareas Preventivas

Uno de los aspectos fundamentales en el estudio de la sexta pregunta es el criterio utilizado para decidir si las tareas proactivas son *técnicamente factibles*. Como se citó anteriormente, antes de considerar si merece la pena realizar una tarea, debemos por su puesto determinar si es técnicamente factible realizarla. La factibilidad técnica de una tarea se define como:

Una tarea es técnicamente factible si físicamente permite reducir o realizar una acción que reduzca las consecuencias del modo de falla asociado, a un nivel que sea aceptable al dueño o usuario del activo.

Desde el punto de vista técnico, existen dos temas a tener en cuenta para la selección de tareas proactivas. Estos son:

- La relación entre la edad del componente que se está considerando y la probabilidad de que falle
- Qué sucede una vez que ha comenzado a ocurrir una falla.

Dichos temas están relacionados con el estudio de las tareas preventivas y predictivas respectivamente.

2.1.7.1.1. Edad y Deterioro

Todo activo físico que cumple una función, está en contacto con el mundo real, esto lo lleva a estar sujeto a una variedad de esfuerzos. Estos esfuerzos hacen que el activo físico se deteriore, disminuyendo su *resistencia al esfuerzo*. Finalmente esta resistencia cae al punto en que el activo físico ya no puede cumplir con el funcionamiento deseado, es decir, falla.

La exposición al esfuerzo es medida de varias maneras incluyendo la cantidad producida, distancia recorrida, ciclos operacionales cumplidos, tiempo calendario o tiempo de funcionamiento. De una u otra manera todas estas medidas están relacionadas con el tiempo, por lo que es común referirse a la exposición total al esfuerzo como la *edad* del componente. Esta conexión entre el esfuerzo y el tiempo sugiere que debe haber una relación directa entre el grado de deterioro y la edad del componente, por lo que el punto en que ocurre la falla dependería de dicha edad, como se puede observar en la Figura 2.22.

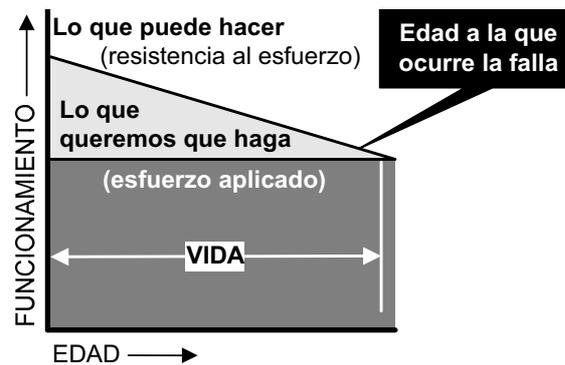


Figura 2.22. Absolutamente predecible

Si esto fuera cierto para todos los activos, seríamos capaces de predecir la vida de los equipos con gran precisión. El punto de vista clásico del mantenimiento preventivo sugiere que esto puede hacerse, todo lo que necesitamos es información suficiente acerca de las fallas. Sin embargo en el mundo real la situación no es tan precisa.

Por lo que, aún componentes que parecen idénticos varían su resistencia inicial a la falla sutilmente. La tasa a la cual esta resistencia declina con la edad también varía. Además, no hay dos componentes sujetos a idénticos esfuerzos a lo largo de sus vidas. Aún cuando estas variaciones sean muy pequeñas, pueden tener un efecto desproporcionado sobre la edad en la que falla el componente.

En la práctica, aunque algunas partes duran mucho más que otras, las fallas de muchas partes que se deterioran de esta manera tenderían a concentrarse alrededor de una vida promedio, como lo muestra la Figura 2.23.



Figura 2.23. Frecuencia de falla y "vida promedio"

Entonces, aun en los casos en que la resistencia declina con la edad, el punto en que ocurre la falla normalmente es menos predecible de lo que sugiere el sentido común. Por lo que la curva de frecuencia de falla que se ve en la Figura

2.23 puede ser dibujada como una curva de probabilidad condicional de falla, como lo muestra la Figura 2.24.

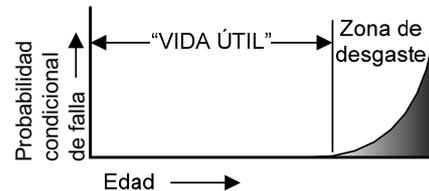


Figura 2.24. Probabilidad condicional de falla y “vida útil”

Si se analizan de este modo una gran cantidad de modos de falla aparentemente idénticos relacionados con la edad, es fácil encontrar algunos que ocurren prematuramente. El resultado de tales fallas prematuras es una curva de probabilidad condicional como lo muestra la Figura 2.25, la cual es igual al patrón de falla B del Anexo I.



Figura 2.25. El efecto de fallas prematuras

Este punto de vista respecto de fallas relacionadas con la edad es algo simplista ya que de hecho hay tres maneras en que la probabilidad de falla puede aumentar a medida que un componente envejece. Dichas maneras corresponden a los patrones de falla A, B y C presentados en el Anexo I. La característica que comparten los patrones A y B es que ambos muestran un punto en el que hay un rápido incremento de la probabilidad condicional de falla. El patrón C tiene un incremento constante de la probabilidad de falla, pero no muestra una zona de desgaste definida.

2.1.7.1.2. Fallas relacionadas con la Edad y Mantenimiento Preventivo

Desde hace siglos – y por cierto desde que se generalizó el uso de las máquinas – el hombre se ha inclinado a creer que la mayoría de los equipos tienden a comportarse como lo muestran las Figuras 2.23 a 2.25. Es decir, la

mayoría de las personas todavía tienden a asumir que los componentes similares, funcionarán confiablemente durante un período, quizás con una pequeña cantidad de fallas tempranas al azar, y luego la mayoría de los componentes se “desgastarán” aproximadamente al mismo tiempo.

En general, los patrones de falla relacionados con la edad se aplican a componentes muy simples, o a componentes complejos que sufren de un modo de falla dominante. En la práctica, comúnmente se los encuentra bajo condiciones de desgaste directo.

Las características del desgaste ocurren mayormente cuando los equipos entran en contacto directo con el producto. Las fallas relacionadas con la edad también tienden a estar asociadas con la fatiga, la oxidación, la corrosión y la evaporación.

Bajo ciertas circunstancias, se disponen de dos opciones preventivas para reducir la incidencia de este tipo de modos de falla, estas son las *tareas de reacondicionamiento cíclico* y las *tareas de sustitución cíclica*.

2.1.7.1.3. Tareas de Reacondicionamiento y Sustitución Cíclica

Los modos de falla que conforman los Patrones A o B del Anexo I son más probables que ocurran después de su *vida útil* como se muestra en la Figura 2.24. Si una pieza o componente es uno de los que sobreviven hasta el fin de su vida útil, es posible sacarlo de servicio antes que entre en la zona de desgaste y tomar alguna clase de acción para prevenir que falle, o por lo menos para reducir las consecuencias de la falla. Si hacemos esto a intervalos fijos sin intentar determinar la condición de la pieza o componente afectado antes de someterlo al proceso de reacondicionamiento, la acción se conoce como *reacondicionamiento cíclico*. Específicamente:

El reacondicionamiento cíclico consiste en reacondicionar la capacidad de un elemento o componente antes o en el límite de edad definido, independientemente de su condición en ese momento.

En el caso de algunos modos de falla relacionados con la edad, simplemente es imposible recuperar la capacidad inicial del elemento o del

componente una vez que ha alcanzado el fin de su vida útil. En estos casos, la capacidad inicial solo puede ser restaurada descartándolo y remplazándolo por uno nuevo. En otros casos, el reacondicionamiento cíclico de un elemento es técnicamente posible, pero es más costo-eficaz cambiarlo por uno nuevo. En ambos casos, si el elemento o componente se reemplaza por uno nuevo a intervalos fijos sin intentar evaluar la condición del activo viejo, la tarea se conoce como *sustitución cíclica*.

Las tareas de sustitución cíclica consisten en descartar un elemento o componente antes, o en el límite de edad definida, independientemente de su condición en ese momento.

Los términos de reacondicionamiento y sustitución cíclica muchas veces se pueden aplicar exactamente a la misma tarea, y el término apropiado depende del nivel al cual se lleva a cabo el análisis.

2.1.7.1.3.1. La Frecuencia de Tareas de Reacondicionamiento y Sustitución Cíclica

La frecuencia con la que se realiza estas tareas está determinada por la vida útil del elemento.

La frecuencia de una tarea de reacondicionamiento o sustitución cíclica está determinada por la edad en la que el elemento o componente muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla.

En general, está muy difundida la creencia de que todos los elementos “tienen una vida”, y reacondicionando el elemento o instalando uno nuevo antes que se alcance esta “vida” automáticamente se lo hace “seguro”. Esto no siempre es verdad, con lo que RCM tiene un cuidado especial focalizado en la seguridad cuando se consideran tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclicas.

RCM reconoce dos tipos diferentes de vida-límite cuando se trata con este tipo de tareas: límite de *vida-segura* y límite de *vida-económica*.

Los límites de ***vida-segura*** sólo se aplican a las fallas que tienen consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, con lo que las tareas asociadas deben reducir la probabilidad de que ocurra una falla antes del fin de su vida útil a un nivel tolerable. Esto significa que este límite de vida no se puede

aplicar a elementos que conforman el patrón A, es decir, no se pueden aplicar a ningún modo de falla en el que exista una probabilidad significativa de ocurrencia de falla cuando el elemento entra en servicio. En condiciones ideales, los límites de vida-segura deben determinarse antes que el elemento se ponga en servicio, para establecer que vida es realmente capaz de alcanzar, y una fracción conservadora de esa vida se usa como límite de vida-segura, como se puede observar en la Figura 2.26.

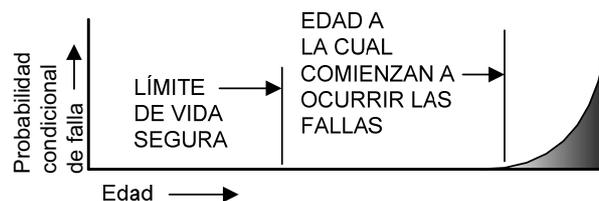


Figura 2.26. Límites de vida-segura

El *límite de vida-económico* está asociado a la experiencia operativa que muchas veces sugiere que desde el punto de vista económico es deseable el reacondicionamiento cíclico o la sustitución cíclica. Dicho límite por lo general es igual a la vida útil.

2.1.7.1.3.2. La Factibilidad Técnica del Reacondicionamiento Cíclico

Las tareas de reacondicionamiento cíclico son técnicamente factibles si:

- Hay una edad identificable en la que el elemento muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla
- La mayoría de los elementos sobreviven a esta edad (todos los elementos si la falla tiene consecuencias para la seguridad o el medio ambiente)
- Se restaura la resistencia original del elemento a la falla, o al menos algo que se aproxime lo suficiente a la condición original como para asegurarse que el elemento continúe siendo capaz de cumplir la función deseada por un período de tiempo razonable.

2.1.7.1.3.3. La Factibilidad Técnica de la Sustitución Cíclica

Una tarea de sustitución cíclica es técnicamente factible bajo las siguientes circunstancias:

- Hay una edad identificable en la que el elemento muestra un rápido incremento en la probabilidad condicional de falla
- La mayoría de los elementos sobreviven a esta edad (todos los elementos si la falla tiene consecuencias para la seguridad o el medio ambiente).

Por lo general no es necesario preguntar si la tarea restaurará la resistencia original porque se reemplaza el elemento por uno nuevo.

2.1.7.1.3.4. La efectividad de las Tareas de Reacondicionamiento Cíclico

Aunque sea técnicamente factible, puede que no merezca la pena el reacondicionamiento cíclico porque puede que otras tareas sean aún más efectivas.

Si no puede encontrarse una tarea más efectiva, existe a menudo la tentación de seleccionar tareas de reacondicionamiento cíclico simplemente basándose en si son técnicamente factibles. Un límite de edad aplicado a un elemento que se comporta como lo muestra la Figura 2.25 significa que algunos elementos recibirán atención antes de que la necesiten, mientras que otros puede que fallen prematuramente, pero el efecto neto puede que sea una reducción global en el número de fallas imprevistas. Sin embargo, aún puede ser que en este caso no valga la pena realizar reacondicionamiento cíclico, ya que una reducción en el número de fallas no es suficiente si la falla tiene consecuencias para la *seguridad o el medio ambiente*.

Por otro lado, si las consecuencias son económicas, necesitamos estar seguros de que a lo largo de un período de tiempo, el costo de realizar la tarea de reacondicionamiento cíclico o de sustitución cíclica es menor al costo de permitir que ocurra la falla.

2.1.7.1.4. Fallas no Asociadas con la Edad

Uno de los desarrollos más desafiantes de la administración del mantenimiento moderno ha sido el descubrimiento de que en realidad muy pocos modos de falla se ajustan a los patrones de falla A, B o C mostrados en el Anexo I. Esto se debe principalmente a una combinación de variaciones en el esfuerzo aplicado y complejidad creciente.

Esfuerzo variable: el deterioro no siempre es proporcional al esfuerzo aplicado, y el esfuerzo no siempre es aplicado consistentemente. Por lo que, cuando los elementos entran en servicio, no siempre es posible predecir cuándo ocurrirán las fallas. En muchos casos hay muy poca o casi ninguna relación entre cuánto tiempo el activo físico estuvo en servicio y la posibilidad de que ocurra la falla; puede ocurrir, por ejemplo, que dicho activo sea sometido a un pico de esfuerzo que reduce permanentemente la resistencia a la falla, pero no causa realmente que el elemento falle. La reducción de la resistencia a la falla hace que el elemento se vuelva vulnerable al próximo pico, que puede o no ocurrir antes de que sea reemplazado por otro motivo.

Complejidad: hoy en día los elementos se hacen cada vez más complejos para mejorar el funcionamiento (al incorporar tecnología nueva o adicional, o automatizando) o para hacerlos más seguros (utilizando dispositivos de seguridad). Una mayor complejidad significa equilibrar lo liviano y lo compacto, necesario para un alto rendimiento, con el tamaño y masa necesarios para tener durabilidad. Esta combinación de complejidad y compromiso incrementa el número de componentes que pueden fallar, y también incrementa el número de interfaces y conexiones entre los componentes; esto a su vez incrementa el número y la variedad de fallas que pueden ocurrir. Además, reduce el margen entre la capacidad inicial de cada componente y el funcionamiento deseado, lo que reduce el margen de deterioro admisible antes de que ocurra la falla.

Patrones D, E, y F: la combinación de esfuerzo variable y respuesta errática a los esfuerzos, en conjunto con una complejidad creciente, significa que en la práctica, cada vez más modos de falla se ajustan a los patrones D, E y F mostrados en el Anexo I. El rasgo más importante de dichos patrones es que luego del período inicial, hay muy poca relación, entre la confiabilidad y la edad operacional. En estos casos, los límites de edad contribuyen muy poco, o nada, a reducir la probabilidad de falla.

Desde el punto de vista de la gerencia de mantenimiento, la conclusión principal que se puede extraer de estos patrones e falla es que la idea de “vida útil” simplemente no se aplica a las fallas al azar, con lo que el “reemplazo a intervalos fijos” o el “reacondicionamiento antes de tal edad” no pueden aplicarse.

La necesidad de prevenir estos tipos de falla, y la incapacidad creciente de las técnicas clásicas para hacerlo, han impulsado el avance de nuevos métodos de prevención de fallas. Entre estos se destacan las técnicas conocidas como mantenimiento predictivo o “a condición”.

2.1.7.2. Mantenimiento Proactivo: Tareas Predictivas

2.1.7.2.1. Fallas Potenciales y Mantenimiento a Condición

Existen muchos modos de falla que no se relacionan con la edad, sin embargo, la mayoría de ellos da algún tipo de advertencia de que están en el proceso de ocurrir, o de que están por ocurrir. La Figura 2.27 ilustra lo que sucede en las etapas finales de la falla; se lo llama *la curva P-F*, porque muestra cómo comienza la falla, cómo se deteriora al punto en que puede ser detectada “P” y luego, si no es detectada y corregida, continúa deteriorándose, generalmente a una tasa acelerada, hasta que llega al punto de falla funcional “F”.

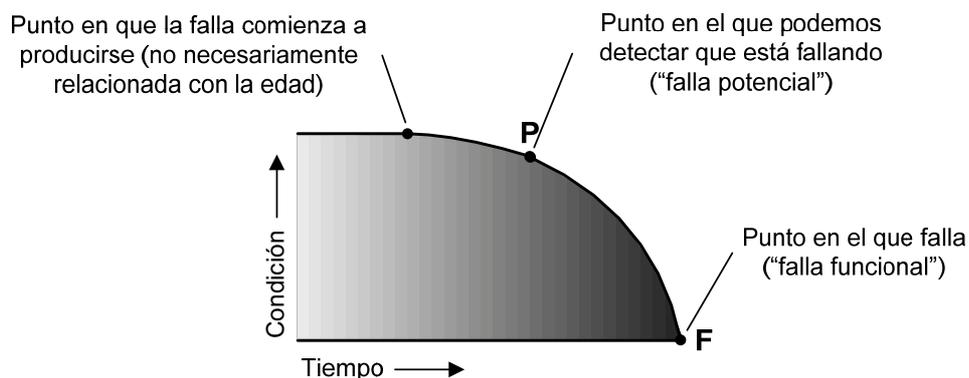


Figura 2.27. La curva P-F

El punto del proceso de la falla en el que es posible detectar si la falla está ocurriendo o si está a punto de ocurrir se conoce como *falla potencial*.

Una falla potencial es un estado identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o en el proceso de ocurrir.

En la práctica, hay miles de maneras para detectar si las fallas están en el proceso de ocurrir. En todo caso, si se detecta una falla potencial, entre el punto P y el punto F que se observa en la figura anterior, es posible que pueda actuarse

para prevenir o evitar las consecuencias de la falla funcional. Las tareas designadas para detectar fallas potenciales se conocen como *tareas a condición*.

Las tareas a condición consisten en chequear si hay fallas potenciales, para que se pueda actuar para prevenir la falla funcional o evitar las consecuencias de la falla funcional.

Las tareas a condición se llaman así porque los elementos que se inspeccionan se dejan en servicio *a condición* de que continúen cumpliendo con los parámetros de funcionamiento especificados. Esto también se conoce como **mantenimiento predictivo** o **mantenimiento basado en la condición**.

2.1.7.2.2. El Intervalo P-F

Además de la falla potencial en sí misma, necesitamos considerar la cantidad de tiempo (o el número de ciclos de esfuerzo) que transcurre entre el punto en el que ocurre una falla potencial, es decir el punto en el que se hace *detectable*, y el punto en el que se deteriora llegando a la falla funcional. Como lo muestra la Figura 2.28, este intervalo se conoce como *el intervalo P-F*.

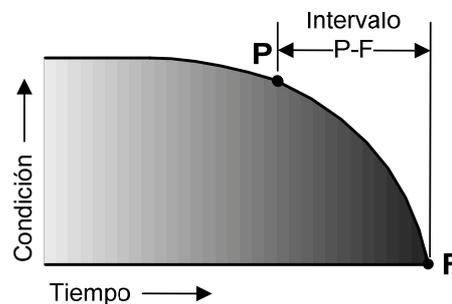


Figura 2.28. El intervalo P-F

El intervalo P-F es el intervalo entre el momento en que ocurre una falla potencial y su decaimiento hasta convertirse en una falla funcional.

El intervalo P-F nos dice con qué frecuencia deben realizarse las tareas a condición. Para detectar la falla potencial antes de que se convierta en falla funcional, el intervalo entre las revisiones debe ser menor al intervalo P-F.

Las tareas a condición deben ser realizadas a intervalos menores al intervalo P-F.

El intervalo P-F también es conocido como el *período de advertencia*, el *tiempo que lleva hasta la falla*, o el *período de desarrollo de la falla*. Puede ser medido en cualquier unidad que provea una indicación de la exposición al esfuerzo (tiempo de funcionamiento, unidades de producción, ciclos parada-arranque, etc.), pero por razones prácticas, generalmente es medido en términos de tiempo transcurrido. Varía para distintos tipos de falla, entre fracciones de segundo a varias décadas.

Cabe recalcar que si se realiza una tarea a condición a intervalos que son más largos que el intervalo P-F, hay una posibilidad de que pasemos totalmente por alto la falla. Por otro lado si se realiza la tarea a intervalos muy cortos respecto al intervalo P-F, se desperdiciarán recursos en el proceso de chequeo.

En la práctica generalmente basta con seleccionar una frecuencia de tarea igual a la mitad del intervalo P-F. Esto asegura que la inspección detectará la falla potencial antes de que ocurra la falla funcional, mientras que provee (en la mayoría de los casos) una cantidad de tiempo razonable para hacer algo al respecto. Esto lleva al concepto de *intervalo P-F neto*.

Intervalo P-F Neto: es el intervalo mínimo que es probable que transcurra entre el *descubrimiento* de una falla potencial y la ocurrencia de la falla funcional. Esto se ilustra en la Figura 2.29, donde se muestra una falla con un intervalo P-F de nueve meses.

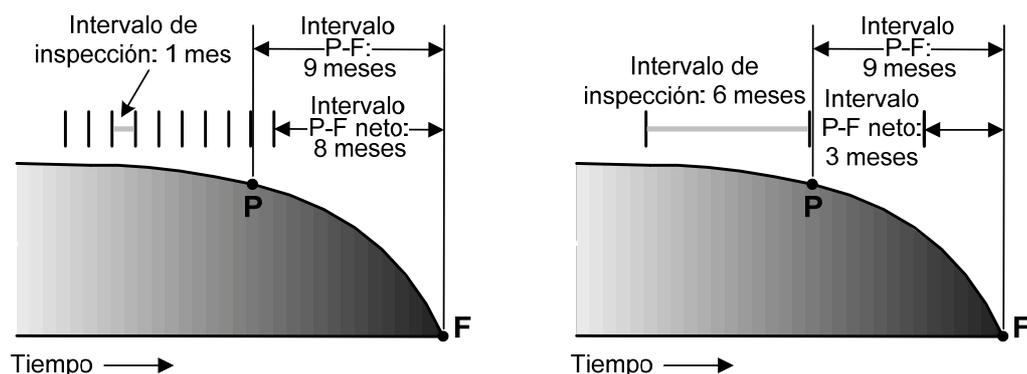


Figura 2.29. Intervalo P-F Neto

Como se puede observar, si el elemento es inspeccionado mensualmente, el intervalo P-F neto es de 8 meses. Por otra parte, si es inspeccionado en

intervalos semestrales, el intervalo P-F neto es de 3 meses. Entonces, en el primer caso la cantidad mínima de tiempo disponible para hacer algo con relación a la falla es cinco meses mayor que en el segundo, pero la tarea de inspección debe ser realizada seis veces más a menudo.

Por lo tanto, el intervalo P-F neto determina la cantidad de tiempo *disponible* para tomar cualquier acción que sea necesaria para reducir o eliminar las consecuencias de la falla.

Dependiendo del contexto operacional del activo físico, el aviso de una falla incipiente le permite a sus usuarios reducir o evitar las consecuencias de distintas maneras: *Tiempo de parada*, al planear una acción correctiva para un momento en el que no afecte a las operaciones, lo cual permitiría que dicha acción sea realizada más rápidamente. *Costos de reparación*, al eliminar el daño secundario que sería causado por fallas no anticipadas, se reduciría el tiempo de parada de máquina y los costos de reparación asociados con la falla. *Seguridad*, la advertencia de la falla da tiempo para detener la planta antes de que la situación se vuelva peligrosa, o para poner fuera de peligro a personas que de lo contrario podrían resultar heridas.

Para que una tarea a condición sea técnicamente factible, el intervalo P-F neto debe ser *mayor* al tiempo requerido para realizar alguna acción que evite o reduzca las consecuencias de la falla. Si el intervalo P-F neto es demasiado corto como para tomar cualquier acción sensata, entonces es claro que la tarea a condición no es técnicamente factible.

2.1.7.2.3. *Factibilidad Técnica de Tareas a Condición.*

Las tareas a condición programadas son técnicamente factibles si:

- Es posible definir una condición clara de falla potencial
- El intervalo P-F es razonablemente consistente
- Resulta práctico monitorear el elemento a intervalos menores al intervalo P-F
- El intervalo P-F neto es lo suficientemente largo como para ser de alguna utilidad.

2.1.7.2.4. *Categorías de Técnicas a Condición*

Las cuatro categorías principales de técnicas a condición son las siguientes:

1. Técnicas de *monitoreo de condición*
2. Técnicas basadas en variaciones en la *calidad del producto*
3. Técnicas de *monitoreo de los efectos primarios*
4. Técnicas de inspección basadas en los *sentidos humanos*.

2.1.7.2.4.1. *Técnicas de monitoreo de condición*

Implican el uso de algún equipo especializado para monitorear el estado de otros equipos, esto es, para detectar fallas potenciales. El monitoreo de condición abarca varios centenares de técnicas diferentes que han sido diseñadas para detectar los efectos de las fallas potenciales, como pueden ser cambios en las características de vibración, cambios en la temperatura, partículas en el aceite lubricante, filtraciones, etc. Estas técnicas generalmente se clasifican bajo los siguientes aspectos:

- Efectos dinámicos
- Efectos de partícula
- Efectos químicos
- Efectos físicos
- Efectos de temperatura
- Efectos eléctricos

Estas técnicas se pueden considerar como versiones altamente sensibles de los sentidos humanos, muchas de ellas pueden detectar una falla potencial varios meses (y hasta años) antes de la falla funcional. No obstante, una de sus mayores limitaciones es que controlan sólo una condición. Con lo que la mayor sensibilidad se paga con la pérdida de versatilidad que tienen los sentidos humanos. La determinación de su factibilidad debe considerar el intervalo P-F asociado y el grado de precisión de cada técnica.

2.1.7.2.4.2. Técnicas basadas en variaciones de la calidad del producto

En algunas industrias, una importante fuente de datos sobre fallas potenciales es suministrada por la función Calidad. A menudo la aparición de un defecto en un artículo producido por una máquina está directamente relacionada con un modo de falla en la propia máquina. Muchos de estos defectos aparecen gradualmente, y así proporcionan evidencia oportuna de fallas potenciales. El uso de esta técnica se ve favorecida por el hecho de que en la gran mayoría de los casos, la transición de estar bajo control a fallar es gradual.

2.1.7.2.4.3. Técnicas de monitoreo de los efectos primarios

Los efectos primarios como velocidad, caudal, presión temperatura, potencia, corriente, etc., son otra fuente de información acerca de la condición de los equipos. Los efectos pueden ser monitoreados por una persona leyendo un instrumento de medición y registrando la lectura manualmente, con una computadora como parte de un sistema de control de procesos, o hasta por un registro convencional de datos. Las mediciones de estos efectos o sus derivados se comparan con cierta información de referencia, dando de este modo evidencia de una falla potencial. Para el correcto uso de esta técnica se debe determinar previamente cuál debe ser la medida cuando todo funciona bien, qué medida corresponde a una falla potencial y cuál corresponde a una falla funcional.

El proceso de toma de mediciones puede ser simplificado sensiblemente si los elementos de medición tienen marcas o colores, como se muestra en la Figura 2.30.

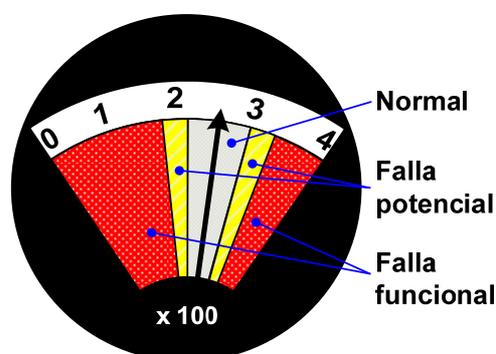


Figura 2.30. Usando elementos de medición para mantenimiento a condición
(Moubray, 2004)

2.1.7.2.4.4. Técnicas de inspección basadas en los sentidos humanos

Quizás las técnicas de inspección a condición más conocidas son aquellas basadas en los sentidos humanos (mirar, oír, tocar y oler). Las principales desventajas de usar esta técnica para detectar fallas potenciales son que:

- En el momento en que es posible detectar la mayoría de las fallas usando los sentidos humanos, el proceso de deterioro ya está bastante avanzado, lo cual significa que los intervalos P-F son generalmente cortos y por tanto los chequeos deben ser realizados más frecuentemente y la respuesta debe ser más rápida.
- El proceso es subjetivo, por lo que es difícil desarrollar criterios de inspección precisos. Además las observaciones dependen en gran parte de la experiencia y hasta del estado mental del observador.

Sin embargo, las ventajas de utilizar los sentidos humanos son las siguientes:

- El ser humano es altamente versátil y puede detectar una amplia variedad de condiciones de falla
- Puede ser muy costo-eficaz si el monitoreo es realizado por personas que de todos modos están cerca de los activos físicos en el transcurso de sus tareas normales
- El ser humano es capaz de juzgar la gravedad de una falla potencial y por ende decidir acerca de qué acciones serán apropiadas.

2.1.7.2.4.5. Selección de la categoría correcta

Muchos modos de falla son precedidos por más de una – a menudo varias – fallas potenciales diferentes, por lo que puede encontrarse más de una categoría de tareas a condición. Cada una de ellas tendrá un intervalo P-F diferente, y cada una requerirá diferentes tipos y niveles de habilidad. Como en muchos casos de mantenimiento, la elección “correcta” dependerá finalmente del contexto operacional en el cual funciona el activo físico, sin embargo es necesario considerar los siguientes aspectos para asegurar la mejor selección de la categoría correcta:

- Considerar todas las advertencias que tienen posibilidad de preceder cada modo de falla, junto con el espectro *completo* de tareas a condición que podrían ser utilizadas para detectar esas advertencias
- Aplicar rigurosamente el criterio de selección de tareas de RCM para determinar cuál de ellas (si existe alguna) es la más costo-eficaz para anticipar el modo de falla en consideración.

2.1.7.2.5. *Cómo determinar el Intervalo P-F*

Generalmente es fácil determinar el intervalo P-F para modos de falla relacionados con la edad cuyas etapas finales de deterioro son lineales. Sin embargo, puede ser sorprendentemente difícil determinarlo en el caso de fallas al azar en las cuales el deterioro se acelera. El principal problema con las fallas al azar es que no se sabe cuándo va a ocurrir la próxima falla, con lo que tampoco se sabe cuándo el próximo modo de falla va a comenzar su camino descendente en la curva P-F, con lo que ni siquiera se puede saber cuándo comenzará la curva P-F. Se considera los siguientes cinco métodos para determinar el intervalo P-F.

2.1.7.2.5.1. *Observación continua*

Teóricamente, es posible determinar el intervalo P-F observando continuamente el elemento que está en servicio hasta que ocurra una falla potencial, notando cuándo pasa esto y luego observando el elemento hasta que falle por completo.

2.1.7.2.5.2. *Comenzar con un intervalo corto y extenderlo gradualmente*

Este método sugiere que el intervalo P-F se puede establecer comenzando los controles a un intervalo muy corto y arbitrario, y después esperar hasta que “se encuentre cual debe ser el intervalo”, tal vez extendiendo gradualmente el intervalo. Desafortunadamente este vuelve a ser el punto en el cual ocurre la falla funcional.

2.1.7.2.5.3. *Intervalos arbitrarios*

Este método sugiere que podría seleccionarse algún intervalo arbitrario “razonablemente corto” para *todas* las tareas a condición. Este enfoque arbitrario

es la manera menos satisfactoria (y la más peligrosa) de determinar las tareas a condición, ya que nuevamente no existe ninguna garantía de que el intervalo arbitrario “razonablemente corto” vaya a ser más corto que el intervalo P-F.

Estos tres métodos citados hasta aquí, aparte de ser poco prácticos, resultan bastante inexactos y *potencialmente muy peligrosos*.

2.1.7.2.5.4. Investigación

La mejor manera de establecer un intervalo P-F preciso es simulando la falla de tal manera que no haya consecuencias serias cuando eventualmente ocurra. Esto no solamente provee información acerca de la vida del componente, sino que también permite que los observadores estudien con comodidad cómo se desarrolla la falla y qué tan rápido sucede. No obstante, al resultar bastante costoso, vale la pena utilizarlo sólo en los casos donde un gran número de componentes están en riesgo y las fallas tienen consecuencias muy serias.

En la mayoría de los casos donde se utilizan estos métodos es imposible, poco práctico o muy caro tratar de determinar los intervalos P-F sobre una base empírica.

2.1.7.2.5.5. Un enfoque racional

Los intervalos P-F pueden estimarse con una precisión sorprendente, basados en el criterio y la experiencia, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

Hacer la pregunta correcta: es esencial que cualquiera que trate de determinar un intervalo P-F comprenda que se está preguntando cuán rápido el elemento falla, es decir, cuánto tiempo (o cuántos ciclos de carga) pasan desde el momento en el que la falla potencial se vuelve detectable hasta el momento en el que alcanzan el estado de falla funcional.

Preguntar a la gente correcta: gente que tiene un conocimiento profundo del activo, la forma en la que falla y los síntomas de cada falla. Para la mayoría de los equipos, esto significa preguntarle a la gente que opera el equipo, a la persona de mantenimiento que se encarga de mantenerlo y a sus supervisores inmediatos. Si el proceso de detección requiere de instrumentos especializados como ser

equipo de monitoreo de condición, el especialista apropiado también debe formar parte del equipo de análisis.

Concentrarse en un modo de falla a la vez: el analista debe concentrarse en las características de un solo modo de falla a la vez, a menos que los síntomas del otro modo de falla sean casi idénticos y la tasa de deterioro sea también muy similar.

Para concluir, debe entenderse de manera clara por cada una de las personas que forman parte de este tipo de análisis, que el objetivo es el de obtener un intervalo de tarea a condición que sea más corto que el intervalo P-F, pero no tanto como para estar derrochando recursos.

2.1.7.2.6. Cuándo vale la pena realizar tareas a condición

Las tareas a condición deben satisfacer los siguientes criterios para que merezcan la pena realizarlas:

- Si una falla es *oculta* y no tiene consecuencias directas. Entonces la tarea a condición para prevenir una falla oculta, debe reducir el riesgo de una falla múltiple a un nivel tolerablemente bajo.
- Si la falla tiene consecuencias para la *seguridad* o *el medio ambiente*, sólo merece la pena realizar una tarea a condición si se puede confiar en que da suficiente advertencia de la falla como para que se pueda actuar a tiempo para evitar las consecuencias para la seguridad o el medio ambiente.
- Si la falla no afecta a la seguridad, la tarea debe ser costo-eficaz. Entonces, en un período de tiempo, el costo de realizar la tarea a condición debe ser menor al costo de no hacerla.

2.1.7.2.7. Selección de tareas proactivas

El orden básico de preferencia para seleccionar tareas proactivas es el siguiente:

2.1.7.2.7.1. Tareas a condición

Son consideradas primero en el proceso de selección por las siguientes razones:

- Casi siempre pueden ser realizadas sin desplazar el activo físico de su ubicación y generalmente mientras continúan en servicio.
- Identifican condiciones específicas de falla potencial, de modo que se puede definir claramente la acción correctiva antes de que comience el trabajo.
- Identifican el punto de falla potencial en los equipos, permitiéndoles cumplir con casi toda su vida útil.

2.1.7.2.7.2. Tareas de reacondicionamiento y de sustitución cíclica

Si no puede encontrarse una tarea a condición apropiada para un modo de falla en particular, la opción siguiente es una tarea de reacondicionamiento o sustitución cíclica. Pero para su aplicación debe considerarse las siguientes desventajas significativas:

- Solamente pueden realizarse con la máquina detenida y (generalmente) requieren envío al taller, por lo que casi siempre afectan de alguna manera a la producción.
- El límite de edad se aplica a todos los elementos, entonces muchos de los elementos o componentes que podrían haber sobrevivido más tiempo serán removidos.
- Las tareas de reacondicionamiento involucran trabajos de taller, por lo que generan una carga de trabajo mucho mayor que las tareas a condición.

El reacondicionamiento y la sustitución cíclica por lo general se consideran juntos porque tienen mucho en común, por lo que partiendo del criterio del más costo-eficaz, el reacondicionamiento cíclico se considera antes de la sustitución cíclica ya que es inherentemente más conservador restaurar las cosas que desecharlas.

2.1.7.2.7.3. Combinación de tareas

Para algunos pocos modos de falla con consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, no se puede encontrar una tarea que *por sí sola* reduzca el riesgo de falla a un nivel tolerablemente bajo, ni tampoco se vislumbra un

rediseño adecuado. En estos casos es posible encontrar una combinación de tareas que reduzcan el riesgo de falla a un nivel tolerable.

2.1.7.2.7.4. El proceso de selección de tareas

En la Figura 2.31 se resume el proceso de selección de tareas. Este orden de preferencia básico es válido para la gran mayoría de los modos de falla, pero no es aplicable para todos los casos. Si una tarea de orden inferior resulta claramente más costo-eficaz para manejar la falla que una tarea de orden superior, entonces debe ser seccionada la tarea de orden inferior.

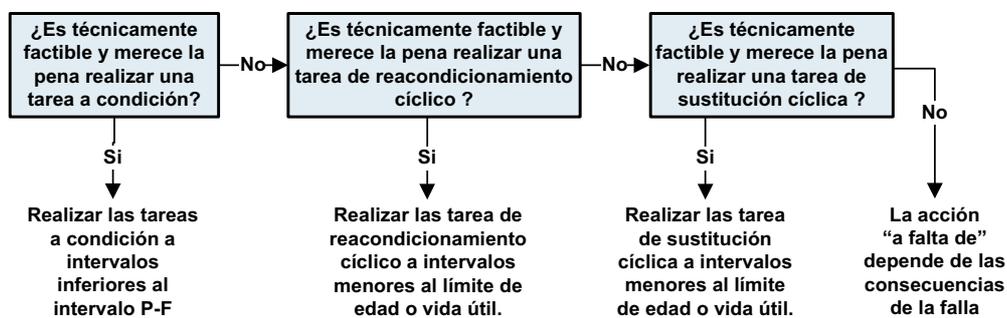


Figura 2.31. El proceso de selección de tareas

2.1.7.3. Acciones “a Falta de”: Tareas de búsqueda de fallas

En el presente numeral y el siguiente, 2.1.7.4, se responde a la última de las preguntas que conforman el proceso de decisión de RCM:

7. ¿Qué debe hacerse sino se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Si no puede hallarse para un modo de falla determinado una tarea proactiva que sea técnicamente factible y que merezca la pena ser realizada, la acción “a falta de” que debe llevarse a cabo está regida por las consecuencias de la falla, de la siguiente manera:

- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que reduzca el riesgo de la falla múltiple asociada con la *función oculta* a un nivel tolerablemente bajo, entonces debe realizarse periódicamente una **tarea de búsqueda de falla**. Si no puede encontrarse una tarea de búsqueda de falla apropiada, la decisión “a falta de” puede resultar en la posibilidad de rediseño.

- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que reduzca el riesgo de una falla que podría afectar a la *seguridad* o al *medio ambiente* a un nivel tolerablemente bajo, **obligatoriamente se debe rediseñar el componente o cambiar el proceso.**
- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que cueste menos, en un periodo de tiempo, que una falla que tiene consecuencias *operacionales*, la decisión “a falta de” inicial es **no realizar mantenimiento programado**. Si esto ocurre y las consecuencias operacionales siguen siendo inaceptables, entonces la decisión “a falta de” secundaria nuevamente es el rediseño
- Si no puede encontrarse una tarea proactiva que cueste menos, en un periodo de tiempo, que una falla que tiene consecuencias *no operacionales*, la decisión “a falta de” inicial es **no realizar mantenimiento programado**, y si los costos de reparación son demasiado altos, la decisión “a falta de” secundaria es nuevamente el rediseño.

La ubicación de las acciones “a falta de” en el marco de decisión RCM se puede observar en la Figura 2.32:

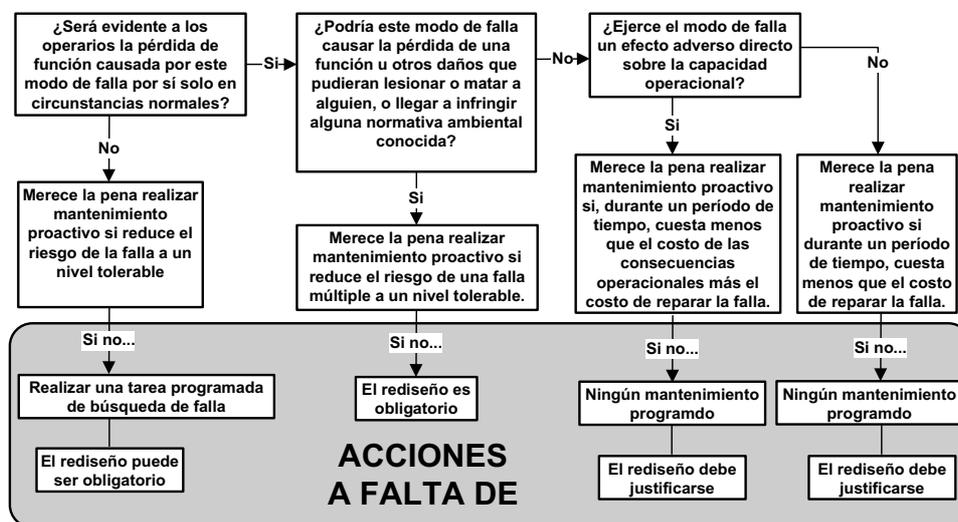


Figura 2.32. Acciones a falta de

2.1.7.3.1. Búsqueda de falla

Mucho de lo que se ha escrito hasta el día de hoy sobre estrategias de mantenimiento se refiere a tres – y solamente tres – tipos de mantenimiento:

predictivo, preventivo y correctivo. Pero existe toda una familia de tareas de mantenimiento que no forman parte de ninguna de estas categorías, que básicamente lo que hacen es chequear si algo todavía funciona. Estas tareas diseñadas para tal efecto se conocen como ***tareas de búsqueda de fallas o chequeos funcionales***.

La búsqueda de fallas se aplica sólo a las fallas ocultas o no reveladas. A su vez, las fallas ocultas sólo afectan a los dispositivos de protección. Si se aplica correctamente el RCM en casi todos los sistemas industriales modernos y de alta complejidad, no es raro encontrar que hasta el 40% de los modos de falla caigan dentro de esta categoría. Es más, hasta el 80% de esos modos de falla requieren búsqueda de fallas, *con lo que hasta la tercera parte de las tareas generadas por un programa comprensivo de desarrollo de estrategias de mantenimiento aplicado correctamente, son tareas de búsqueda de fallas.*

Al momento, muchos de los programas de mantenimiento existentes sólo prestan cierta atención a menos de la tercera parte de los dispositivos de protección (y por lo general a intervalos inapropiados). Las personas que operan y mantienen la planta cubierta por estos programas saben que hay otra tercera parte de estos dispositivos que no se les presta atención, mientras que no es raro descubrir que nadie sabe que existe el tercio restante. Esta falta de toma de conciencia y atención indica que la mayoría de los dispositivos de protección en la industria – la última línea de protección cuando las cosas salen mal – son poco mantenidas, o lo que es aún peor, no reciben mantenimiento alguno. Todo esto está llevando en muchos casos a situaciones completamente insostenibles. Por lo tanto, si la industria toma en serio la seguridad y la integridad del medio ambiente, necesita dársele la máxima prioridad a toda la cuestión de búsqueda de fallas como tema urgente.

2.1.7.3.1.1. Fallas múltiples y búsqueda de fallas

Ocurre una falla múltiple cuando falla una función protegida mientras un dispositivo de protección se encuentra en estado de falla, por tanto, la probabilidad de una falla múltiple puede ser reducida disminuyendo la indisponibilidad del dispositivo de seguridad.

Cuando los criterios para decidir si cualquier tipo de mantenimiento proactivo es técnicamente factible y si merece la pena realizarse, es aplicado a funciones ocultas, se observa que menos de un 10% de estas funciones son susceptibles a alguna forma de mantenimiento predictivo o preventivo. A pesar de ello, sigue siendo esencial hacer algo para reducir la probabilidad de la falla múltiple al nivel requerido. Esto puede hacerse revisando periódicamente si la función oculta sigue funcionando, de ahí que las tareas de búsqueda de fallas serán:

Las tareas cíclicas de búsqueda de falla consisten en chequear una función oculta a intervalos regulares para ver si ha fallado.

2.1.7.3.1.2. Aspectos técnicos de la búsqueda de fallas

Considerando que el objetivo de las tareas de búsqueda de fallas es darnos la tranquilidad que un dispositivo de seguridad proveerá la protección requerida si fuese necesario, los siguientes aspectos técnicos deben tenerse en cuenta durante su realización.

Chequear el sistema de protección completo. Durante una tarea de búsqueda de falla se debe asegurar de detectar todos los modos de falla que tengan posibilidad de causar la falla del dispositivo de seguridad, especialmente en dispositivos complejos, tales como circuitos eléctricos. En estos casos, la función del sistema completo debe ser revisada *desde el sensor hasta el actuador*.

No perturbarlo. Desarmar cualquier cosa conlleva la posibilidad de que se vuelva a armar de manera incorrecta. Si esto ocurre con una función oculta, nadie sabrá que se dejó en estado de falla hasta el próximo chequeo (o hasta que se necesite). Por esta razón, siempre se debe buscar formas de chequear las funciones de dispositivos de seguridad sin desconectarlos o perturbarlos de ninguna manera. Si de todas formas, dichos dispositivos deben ser desarmados o desmontados completamente para chequear si están funcionando correctamente, debe tenerse mucho cuidado de realizar la tarea de manera tal que los dispositivos continúen funcionando cuando sean vueltos a poner en servicio.

Debe ser físicamente posible chequear la función. En un pequeño pero significativo número de casos, es imposible llevar a cabo una tarea de búsqueda de falla de cualquier tipo. Éstas son:

- Cuando es imposible tener acceso al dispositivo de seguridad para revisarlo (esto es casi siempre resultado de un diseño mal concebido)
- Cuando la función del dispositivo no puede ser revisada sin destruirlo (como en el caso de los fusibles y los discos de ruptura).

Minimizar el riesgo mientras la tarea está siendo realizada. Debe ser posible llevar a cabo una tarea de búsqueda de falla sin incrementar significativamente el riesgo de la falla múltiple. Si debe desconectarse un dispositivo de seguridad para llevar a cabo una tarea de búsqueda de falla, o si tal dispositivo es revisado y se encuentra en estado de falla, entonces debe proveerse una protección alternativa o debe desactivarse la función protegida hasta que sea restituida la protección original. A pesar que se requiera, la búsqueda de fallas no debe llevarse a cabo en sistemas donde hacerlas fuese muy peligroso.

La frecuencia debe ser práctica. Debe resultar práctico realizar la tarea de búsqueda de falla a los intervalos requeridos.

2.1.7.3.2. Intervalos de tareas de búsqueda de falla

Para establecer los intervalos de búsqueda de falla, deben tomarse en cuenta dos variables: disponibilidad y confiabilidad.

Excluyendo el tiempo de tarea y el de reparación, es decir, el tiempo de no disponibilidad en el que se incurre durante la tarea de búsqueda de falla y la falta de disponibilidad causada por el tiempo necesario para reparar el dispositivo si se lo encuentra fallado, el intervalo de tareas de búsqueda de falla "FFI" (Failure Finding Interval) se determina como sigue:

$$FFI = 2 \times \text{indisponibilidad} \times MTBF \quad [2.1]$$

Por lo que, para determinar el intervalo de búsqueda de falla para un solo dispositivo de seguridad, se necesitará conocer su *tiempo medio entre fallas* y la

disponibilidad deseada del dispositivo (de la que se puede determinar la indisponibilidad para ser utilizada en la fórmula).

Usando la citada fórmula se puede elaborar la Tabla 2.1 para determinar más fácilmente el FFI.

Tabla 2.1. Intervalos de búsqueda de falla, disponibilidad y confiabilidad

Disponibilidad que requerimos para la función oculta	99.99%	99.95%	99.9%	99.5%	99%	98%	95%
Intervalo de búsqueda de falla (como un % del MTBF)	0.02%	0.1%	0.2%	1%	2%	4%	10%

(Moubray, 2004)

Habiendo establecido la relación entre disponibilidad, confiabilidad y los intervalos de búsqueda de fallas, lo siguiente es decidir que disponibilidad se requiere, para lo cual se puede seguir los siguientes tres pasos:

1. Primero preguntar qué probabilidad de *falla múltiple* está preparada para tolerar la organización
2. Luego determinar la probabilidad que existe de que falle la función *protegida* en el período de tiempo considerado
3. Por último determinar qué disponibilidad debe alcanzar la función *protectora* para reducir la probabilidad de falla múltiple al nivel deseado.

Además del método considerado para determinar los intervalos de búsqueda de falla, se debe considerar los siguientes aspectos, a ser aplicados de acuerdo a las condiciones específicas de cada AMFE.

2.1.7.3.2.1. Métodos rigurosos para calcular FFI

Es posible determinar los intervalos de búsqueda de fallas considerando la influencia de todas las variables, mediante las siguientes ecuaciones:

$$FFI = \frac{2 \times M_{TOR} \times M_{GIDO}}{M_{FM}}, \text{ donde} \quad [2.2]$$

M_{TOR}: Tiempo medio entre fallas del dispositivo de protección

M_{GIDO}: Tiempo medio entre fallas de la función protegida (o sistema protegido)

M_{FM}: Tiempo medio entre fallas múltiples

Cuando la propia tarea de búsqueda de fallas puede causar la falla, entonces se puede introducir las siguientes variables:

$$FFI = \frac{2 \times M_{OTRO}}{(1-p)} \times \left(\frac{M_{GIDO}}{M_{FM}} - p \right), \text{ donde} \quad [2.3]$$

p: Probabilidad de que un dispositivo sea dejado en estado de falla después de una prueba

M_{OTRO}: Media del tiempo entre fallas causadas por otros fenómenos aparte de la prueba

En la fórmula anterior, la expresión (1-p) puede ser ignorada si p es menor a 0.05.

2.1.7.3.2.2. Fuentes de datos para los cálculos de FFI

Si la información requerida no está disponible –y por lo general no lo está– es necesario estimar que valores probables tendrán estas variables *en el contexto bajo consideración*. En ciertos casos puede obtenerse información de alguna de las siguientes fuentes:

- Los fabricantes del equipo
- Bancos de datos comerciales
- Otros usuarios de equipos similares.

Al utilizar datos de fuentes externas, se debe observar muy especialmente cómo se compara el contexto operacional de los componentes para los que se recolectaron los datos con respecto al contexto en el que el equipo en consideración está operando.

A menudo las estimaciones de las variables deben hacerse basadas en el conocimiento y la experiencia de las personas que más saben acerca de los equipos, que en muchos casos son los operadores de producción y de mantenimiento.

2.1.7.3.2.3. Un enfoque informal para ajustar Intervalos de búsqueda de falla

No toda función oculta es lo suficientemente importante como para justificar el tiempo y el esfuerzo necesarios para hacer un análisis riguroso completo. Esto aplica principalmente a fallas múltiples que no afectan a la seguridad o el medio ambiente, o fallas múltiples que podrían afectar a la seguridad pero donde la función protegida es inherentemente muy confiable y la amenaza para la seguridad es muy marginal. En estos casos, puede ser suficiente tomar una visión general del sistema protegido completo en su contexto operacional, e ir directamente a una decisión acerca del nivel de disponibilidad deseado para la función oculta.

2.1.7.3.2.4. Otros métodos para calcular Intervalos de búsqueda de falla

Las técnicas descritas para determinar intervalos de búsqueda de falla no son en absoluto exhaustivas. La red Mundial de Licenciarios de Aladon para RCM ha desarrollado muchas variantes adicionales, las cuales incluyen fórmulas para:

- Sistemas de votación
- Sistemas múltiples, independientes y redundantes
- Cálculo de intervalos basados en optimización de costos para sistemas en los que las fallas múltiples no afectan la seguridad ni el medio ambiente.

2.1.7.3.2.5. La practicidad de los Intervalos de Tareas

Los métodos enunciados para calcular intervalos de búsqueda de falla a veces producen intervalos muy cortos o muy largos, que pueden tener las siguientes implicaciones:

- Un intervalo de tarea de búsqueda de falla muy corto tiene dos implicancias principales: a veces es demasiado corto para ser práctico y, la tarea podría causar acostumbramiento (por ejemplo si una alarma de incendio se prueba demasiado seguido). En estos casos, la tarea propuesta es rechazada y se avanza a la siguiente etapa del proceso de toma de decisión RCM.

- Otras veces nos encontramos con intervalos muy largos, a veces del orden de 100 años o más. Aquí el proceso claramente sugiere que directamente no necesitamos preocuparnos de realizar la tarea.
- En casos poco comunes, aparecen intervalos de tarea que son significativamente mayores al índice de demanda (M_{GIDO}). Esto hace que tenga poco sentido llevar a cabo una tarea de búsqueda de fallas a intervalos mayores a los que el sistema se chequea a sí mismo.

2.1.7.3.3. *La factibilidad técnica de la Búsqueda de falla*

La búsqueda de fallas es técnicamente factible si:

- Es posible realizar la tarea
- La tarea no incrementa el riesgo de una falla múltiple
- Es práctico realizar la tarea al intervalo requerido

El objetivo de una tarea de búsqueda de falla es reducir la probabilidad de la falla múltiple asociada con la función oculta a un nivel tolerable. Sólo merece la pena realizarse si logra este objetivo.

Merece la pena realizar la búsqueda de falla si reduce la probabilidad de la falla múltiple asociada a un nivel tolerable.

Es necesario tener en cuenta que un mantenimiento proactivo exitoso previene que los elementos fallen, mientras que la búsqueda de falla acepta que estarán algún tiempo – preferiblemente no mucho – en estado de falla, por lo que su realización sólo debe ser recomendada en caso de no poder encontrar una tarea proactiva más efectiva.

Si se determina que una tarea de búsqueda de falla no es técnicamente factible o no merece la pena realizarse, hemos agotado todas las posibilidades que pueden permitirnos obtener la prestación deseada del activo físico existente, en cuyo caso pueden enfrentarse como lo muestra el proceso de decisión de la Figura 2.33.

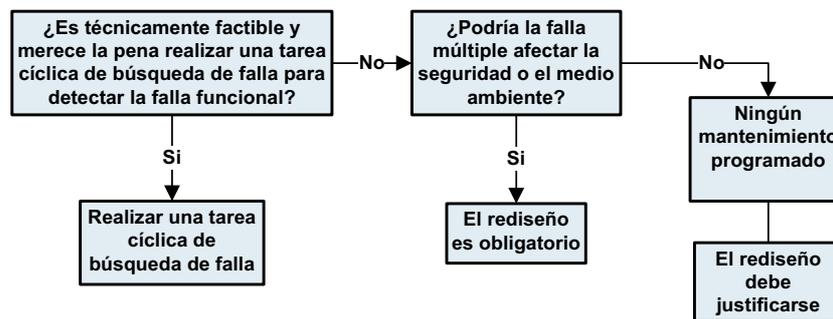


Figura 2.33. Búsqueda de falla, el proceso de decisión

2.1.7.4. Otras Acciones “a Falta de”

Se ha visto que la búsqueda de fallas es la primera acción “a falta de” en caso de no encontrarse una tarea proactiva apropiada para una *falla oculta*. Pero si no podemos encontrar una tarea de búsqueda de fallas apropiada, entonces el rediseño es obligatoriamente la acción secundaria “a falta de” si la falla múltiple tiene consecuencias sobre la seguridad o el medio ambiente.

También se ha visto que si una falla evidente tiene *consecuencias para la seguridad o el medio ambiente* y no puede encontrarse una tarea proactiva apropiada, también debe cambiarse algo para que la situación sea segura.

Sin embargo, si la falla es evidente, y no afecta la seguridad ni el medio ambiente, o si es oculta y la falla múltiple no afecta la seguridad ni el medio ambiente, entonces la acción inicial “a falta de” es *no realizar ningún mantenimiento programado*.

2.1.7.4.1. Ningún mantenimiento programado

En estos casos, los elementos son dejados en servicio hasta que ocurra una falla funcional, momento en el cual son reparados o reemplazados. “*Ningún mantenimiento programado*” sólo es válido si:

- No puede encontrarse una tarea cíclica apropiada para una función oculta, y la falla múltiple asociada no tiene consecuencias para la seguridad o el medio ambiente.
- No puede encontrarse una tarea proactiva que sea costo-eficaz para fallas que tienen consecuencias operacionales o no operacionales.

Como se observa, si no puede encontrarse una tarea proactiva apropiada para una falla bajo alguna de estas circunstancias, simplemente significa que no se lleva a cabo *mantenimiento programado* para ese componente en su forma actual. No significa que simplemente se olvide de él.

2.1.7.4.2. *Rediseño*

El término “rediseño” es utilizado por el RCM en su sentido más amplio. En primer lugar, se refiere a cualquier cambio en la especificación de cualquier componente de un equipo. Esto significa cualquier acción que implique un cambio en un plano o una lista de piezas, incluyendo una *modificación en la especificación de un componente, el agregado de un elemento nuevo, la sustitución de una máquina entera* por una de marca o tipo diferente, *o cambiar una máquina de lugar*. También significa cualquier otro cambio de una sola vez a un *proceso o procedimiento* que afecte la operación de la planta. A su vez incluye el *entrenamiento* como un método para lidiar con un modo de falla específico (que puede ser visto como un “rediseño” de la capacidad de la persona que está siendo entrenada).

2.1.7.4.2.1. *Diseño y mantenimiento*

Cualquier cambio es costoso, involucra el costo de desarrollar la nueva idea, el costo de convertir la idea en realidad y el costo de implementar el cambio; por lo que cualquier modificación debe ser abordada con gran precaución, prestando especial atención a los temas siguientes:

¿Qué consideramos primero – el diseño o el mantenimiento?

El proceso RCM considera primero el mantenimiento por dos razones:

La mayoría de las modificaciones llevan de seis meses a tres años desde su concepción hasta que se entregan, dependiendo del costo y la complejidad del nuevo diseño; por lo que la realidad de hoy debe tratarse antes que los cambios en el diseño de mañana.

En segundo lugar, la mayoría de las organizaciones se encuentran ante muchas más oportunidades aparentemente deseables para mejorar el diseño que las que son físicamente o económicamente factibles. Al enfocarse en las

consecuencias de las fallas, el RCM ayuda mucho a desarrollar prioridades racionales para estos proyectos, separando aquellos que son esenciales de aquellos otros que son meramente deseables.

Confiabilidad inherente versus funcionamiento deseado. Como se anotó anteriormente, la capacidad inicial de cualquier activo físico se establece por su diseño y por cómo está hecho, y que el mantenimiento no puede dar confiabilidad más allá de la que es inherente en su diseño. Por lo tanto, si el funcionamiento deseado excede la confiabilidad inherente, entonces ningún tipo de mantenimiento podrá brindar el funcionamiento deseado, por lo que se hace necesario mirar más allá del mantenimiento para encontrar soluciones, pudiendo incluir las siguientes opciones:

- Modificar el equipo
- Cambiar los procedimientos operacionales
- Bajar nuestras expectativas y decidir convivir con el problema

2.1.7.4.2.2. El rediseño como acción “a falta de”

Como se puede observar en la Figura 2.32, el rediseño se considera cuando tenemos:

Consecuencias ambientales o para la seguridad. Si una falla pudiera afectar la seguridad o el medio ambiente y no puede encontrarse ninguna tarea proactiva ni combinación de tareas que reduzca el riesgo de la falla a un nivel tolerable, algo debe ser cambiado. En estos casos el rediseño generalmente tiene uno de los dos siguientes objetivos:

- Reducir la probabilidad de que ocurra el modo de falla a un nivel que sea tolerable. Esto generalmente se logra reemplazando el componente afectado por otro que sea más resistente y más confiable.
- Cambiar el componente o el proceso de tal manera que la falla deje de tener consecuencias para la seguridad o el medio ambiente. Esto se logra comúnmente al instalar uno o más dispositivos de seguridad.

Cuando se agrega un dispositivo, se debe considerar que los nuevos requerimientos de su mantenimiento también deben ser analizados.

Las consecuencias ambientales y para la seguridad también pueden ser reducidas eliminando materiales de procesos que puedan presentar una amenaza, o hasta abandonando del todo un proceso peligroso.

Fallas ocultas. En el caso de fallas ocultas, el riesgo de una falla múltiple puede ser reducido modificando el equipo en una de cuatro maneras:

- Hacer que la función oculta se haga evidente agregando otro dispositivo, el cual puede llamar la atención al operador acerca de la falla de la función oculta.
- Sustituir la función oculta por una función evidente, que en la mayoría de los casos significa sustituir un dispositivo de seguridad no dotado de seguridad inherente por uno que tenga seguridad inherente. Esto es sorprendente difícil de hacer en la práctica, pero si se hace, la necesidad de una tarea de búsqueda de falla desaparece inmediatamente.
- Sustituir la función oculta existente por un dispositivo más confiable (aunque también oculto).
- Duplicar la función oculta. Si no es posible encontrar un solo dispositivo de seguridad que tenga un MTBF lo suficientemente alto como para dar el nivel deseado de protección, se puede lograr los objetivos anteriores duplicando (o hasta triplicando) la función oculta.

Consecuencias operacionales y no operacionales. Si no puede encontrarse una tarea proactiva que sea técnicamente factible y que merezca la pena ser realizada para fallas con consecuencias operacionales o no operacionales, la decisión “a falta de” inmediata es no realizar mantenimiento programado. Sin embargo, puede que todavía sea conveniente modificar el equipo para reducir los costos totales y obtener algunos de los siguientes resultados:

- Reducir el número de veces que ocurre una falla, o posiblemente eliminarla totalmente, haciendo más resistente o más confiable el componente.
- Reducir o eliminar las consecuencias de la falla (por ejemplo, al instalar un equipo de reserva).

- Hacer que la tarea proactiva sea costo-eficaz (por ejemplo, haciendo más accesible un componente).

Como en estos casos las consecuencias de la falla son puramente económicas, las modificaciones deben ser *justificadas económicamente*.

Un estudio detallado de costo-beneficio que tome en cuenta todos estos factores puede llevar mucho tiempo, por esto ayuda saber de antemano si es posible que el esfuerzo se vea compensado. Para ayudar en una evaluación preliminar, Nowlan & Heap desarrollaron el diagrama de decisión mostrado en la Figura 2. 34.

Cada una de las preguntas debe ser evaluada detenidamente, teniendo en cuenta en todo momento el contexto operacional de los equipos sobre los que se está considerando un posible rediseño.

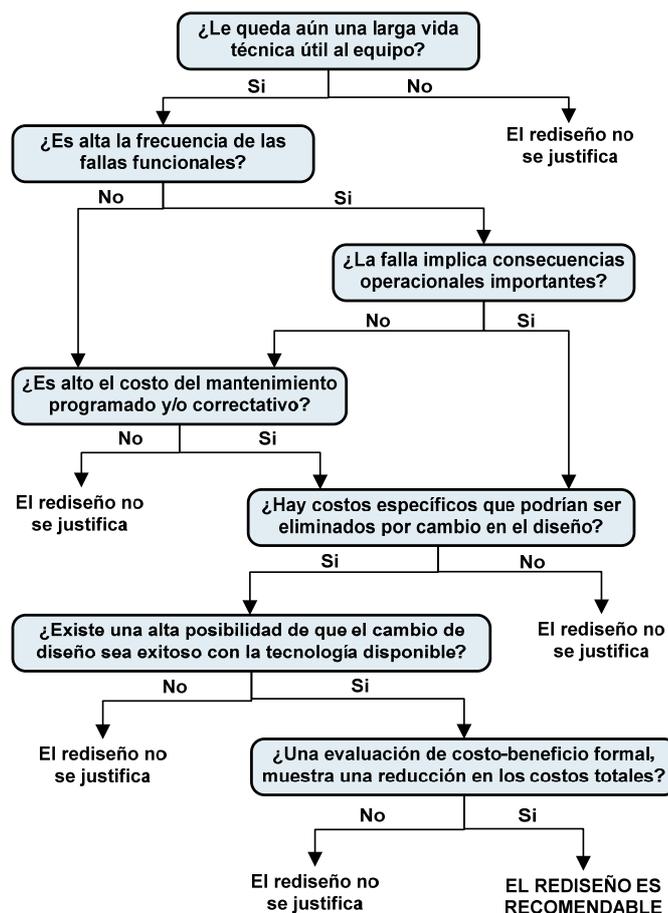


Figura 2.34. Diagrama de decisión para una evaluación preliminar de una modificación propuesta

2.1.7.4.3. Recorridas de Inspección

Las recorridas de inspección sirven para dos propósitos. El primero es detectar daños accidentales. Estos chequeos pueden incluir por razones de conveniencia, ciertas tareas a condición específicas, pero en general los daños pueden ocurrir en cualquier momento y no se relacionan con ningún nivel definible de resistencia a la falla. Asimismo, los chequeos no están basados en las características de la falla de ningún componente en particular, sino que su propósito es detectar excepciones imprevistas en el comportamiento de las fallas.

Las recorridas de inspección también pretenden detectar problemas debidos a la ignorancia o negligencia, tales como materiales peligrosos u objetos extraños abandonados, derrames, y otros conceptos relacionados con la limpieza y conservación del lugar de trabajo. También proporcionan a las jefaturas una oportunidad de asegurar que los parámetros generales de mantenimiento sean satisfactorios, y pueden ayudar a controlar que las rutinas de mantenimiento se están realizando correctamente.

2.1.8. EL DIAGRAMA DE DECISIÓN DE RCM

De los dos documentos centrales utilizados en la aplicación del RCM, el primero es la HOJA DE INFORMACIÓN RCM mostrada en el Anexo II; el segundo de dichos documentos, la HOJA DE DECISIÓN RCM, mostrada en el Anexo IV, se describe a continuación.

2.1.8.1. El proceso de Decisión de RCM

El Diagrama de Decisión RCM, que integra todos los procesos de decisión en una estructura única, como se puede observar en la Figura 2.35, se aplica a cada uno de los modos de falla listados en la Hoja de Información RCM.

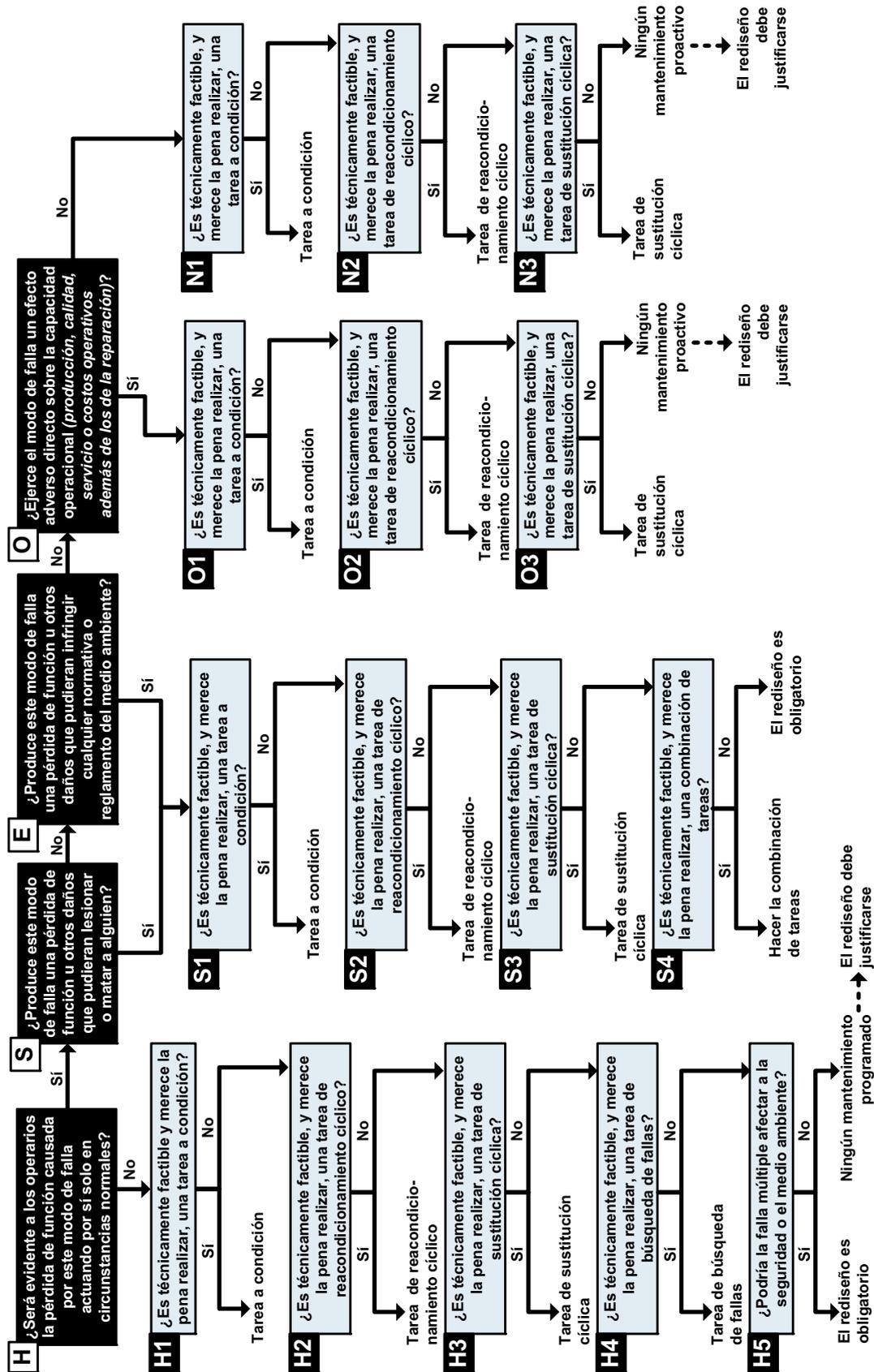


Figura 2.35. EL DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM

Por otro lado, la hoja de Decisión RCM permite asentar las respuestas a las preguntas formuladas en el Diagrama de Decisión, y, en función de dichas respuestas, registrar lo siguiente:

- Qué mantenimiento de rutina (si lo hay) será realizado, con qué frecuencia será realizado y quién lo hará
- Qué fallas son lo suficientemente serias como para justificar el rediseño
- Casos en los que se toma la decisión deliberada de dejar que las fallas ocurran.

La Hoja de Decisión, como se puede observar en el Anexo IV, está dividida en dieciséis columnas. Las columnas F, FF y FM (Función, Falla Funcional y Modo de Falla) identifican el modo de falla que se analiza en esa línea. Se utilizan para correlacionar las referencias de las Hojas de Información y las hojas de Decisión, como lo muestra la Figura 2.36.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM	SISTEMA <i>Sistema de bombeo de agua de refrigeración</i>														
	SUBSISTEMA														
FUNCIÓN			FALLA FUNCIONAL (Pérdida de Función)						MODO DE FALLA (Causa de la falla)						
1	Transferir agua del tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto		A	Incapaz de transferir agua en lo absoluto					1	Se agarrota el cojinete por el uso y desgaste normal					

HOJA DE DECISIÓN RCM	SISTEMA <i>Sistema de bombeo de agua de refrigeración</i>														
	SUBSISTEMA														
Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de					
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3	H4	H5	S4
1	A	1													

Figura 2.36. Correlación de referencias entre las Hojas de Información y las Hojas de Decisión

Los encabezamientos de las próximas diez columnas se refieren a las preguntas del Diagrama de Decisión de la Figura 2.35, de manera que:

- Las columnas tituladas H, S, E y O son utilizadas para registrar las respuestas a las preguntas concernientes a las consecuencias de cada modo de falla
- Las tres columnas siguientes (tituladas H1, H2, H3, etc.) registran si ha sido seleccionada una tarea proactiva, y si es así, que tipo de tarea
- Si se hace necesario responder cualquiera de las preguntas “a falta de”, las columnas encabezadas con H4 y H5, o la S4 son las que permiten registrar esas respuestas.

Las últimas tres columnas registran la tarea que ha sido seleccionada (si la hay), la frecuencia con la que debe hacerse, y quién ha sido seleccionado para realizarla. La columna de “Tarea Propuesta” también se utiliza para registrar los casos en los que se requiere rediseño, o si se ha decidido que el modo de falla no necesita mantenimiento programado.

A continuación se detalla cada uno de los casos mencionados.

2.1.8.1.1. Consecuencias de la falla

Las preguntas H, S, E y O se hacen para cada modo de falla, y las respuestas son registradas en la Hoja de Decisión basándose en lo que muestra la Figura 2.37.

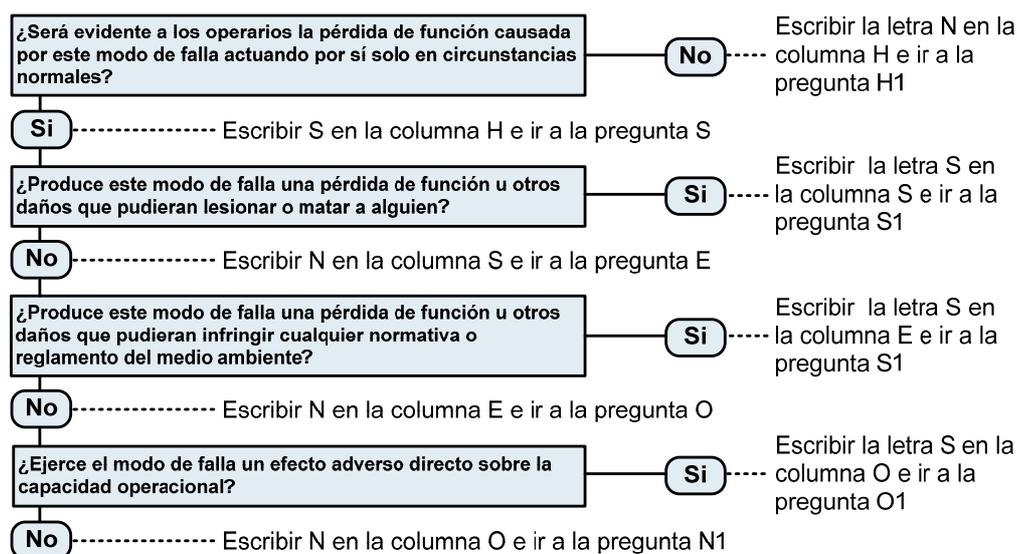


Figura 2.37. Cómo se registran las consecuencias de falla en la Hoja de Decisión

En la Figura 2.38 se puede observar como las respuestas a estas preguntas se registran en la Hoja de Decisión, tomando en cuenta lo siguiente:

- Cada modo de falla es ubicado en solo una categoría de consecuencias. Entonces, si es clasificado como que tiene consecuencias ambientales, no se evalúa también sus consecuencias operacionales (al menos cuando se realiza el primer análisis de un activo físico cualquiera). Es decir, si se registra una "S" en la columna E, no se registra nada en la columna O
- Una vez que las consecuencias del modo de falla han sido categorizadas, el próximo paso es buscar una tarea proactiva adecuada. La Figura 2.38 también resume el criterio utilizado para decidir si *merece la pena* realizar tales tareas.

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				
F	FF	FM	H	S	E	O	
3	A	1	N				Una falla oculta: Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir el riesgo de esta falla a un nivel tolerable
5	B	2	S	S			Consecuencias para la seguridad: Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir por sí sola el riesgo de esta falla a un nivel tolerable
2	C	4	S	N	S		Consecuencias para el medio ambiente: Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva debe reducir por sí sola el riesgo de esta falla a un nivel tolerable
1	A	5	S	N	N	S	Consecuencias operacionales: Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva a través de un período de tiempo debe costar menos que el costo total de las consecuencias operacionales más el costo de la reparación de la falla que pretende prevenir
1	B	3	S	N	N	N	Consecuencias No-operacionales: Para que merezca la pena realizarla, cualquier tarea preventiva a través de un período de tiempo debe costar menos que el costo de la reparación de las fallas que pretende prevenir.

Figura 2.38. Consecuencias de falla

2.1.8.1.2. Tareas Proactivas

Las columnas de la octava a la décima son utilizadas para registrar si se ha seleccionado una tarea proactiva, de la siguiente manera:

- La columna titulada H1/S1/O1/N1 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea a condición apropiada para anticipar el modo de falla a tiempo como para evitar las consecuencias.
- La columna titulada H2/S2/O2/N2 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de reacondicionamiento programado apropiada para prevenir las fallas.
- La columna titulada H3/S3/O3/N3 es utilizada para registrar si se pudo encontrar una tarea de sustitución cíclica para prevenir las fallas.

En cada caso, una tarea sólo es apropiada si merece la pena realizarla y si es técnicamente factible. En esencia, esto se cumpla si es posible dar una respuesta positiva a *todas* las preguntas presentadas en la Figura 2.39.

H1	H2	H3
S1	S2	S3
O1	O2	O3
N1	N2	N3
S		
N	S	
N	N	S

¿Es técnicamente factible realizar una tarea para detectar si está ocurriendo una falla o está a punto de ocurrir?
 ¿Hay alguna clara condición de falla potencial? ¿Cuál es? ¿Cuál es el intervalo P-F? ¿Es suficientemente largo como para ser de utilidad? ¿Es razonablemente consistente? ¿Es posible hacer la tarea a intervalos menores al intervalo P-F?

¿Es técnicamente factible realizar una tarea de reacondicionamiento programado para reducir la frecuencia de falla (evitar todas las fallas en el caso en que afecte la seguridad)?
 ¿Hay alguna edad en la que aumenta rápidamente la probabilidad condicional de falla? ¿Cuál es? ¿Ocurren la mayoría de las fallas después de esta edad (todos en el caso de consecuencias para la seguridad o el medio ambiente)? ¿Restituirá la tarea la resistencia original a la falla?

¿Es técnicamente factible realizar una tarea de sustitución cíclica para reducir la frecuencia de la falla (evitar todas las fallas en el caso de que afecte a la seguridad)?
 ¿Hay alguna edad en la que aumenta rápidamente la probabilidad condicional de falla? ¿Cuál es? ¿Ocurren la mayoría de las fallas después de esta edad (todos en el caso de consecuencias para la seguridad o el medio ambiente)?

Figura 2.39. Criterios de factibilidad técnica

2.1.8.1.3. Las preguntas a “a Falta de”

Las columnas H4, H5 y S4 en la Hoja de Decisión son utilizadas para registrar las respuestas a las tres preguntas “a falta de”. En la Figura 2.40 se resume como se responde a estas preguntas.

Referencia de Información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de		
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4
							O1	O2	O3			
							N1	N2	N3			
3	A	1	N				N	N	N	S		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una tarea de búsqueda de falla?												
Registrar "Sí", si es posible realizar la tarea y resulta práctico hacerlo con la frecuencia requerida y reduce el riesgo de la falla múltiple a un nivel tolerable.												
4	B	4	N				N	N	N	S		
4	C	2	N				N	N	N	N		
¿Podría la falla múltiple afectar la seguridad o el medio ambiente?												
(Sólo se hace esta pregunta si la respuesta a la pregunta H4 es No). Si la respuesta a esta pregunta es sí, el rediseño es obligatorio. Si la respuesta es no, la "acción a falta de" es no realizar mantenimiento programado , pero el rediseño puede ser deseable.												
5	B	2	S	S			N	N	N		S	
2	A	5	S	S			N	N	N	N		
¿Es técnicamente factible y merece la pena realizar una combinación de tareas?												
"Sí", si una combinación de dos o más tareas proactivas cualquiera reducen el riesgo de falla a un nivel tolerable (esto rara vez sucede). Si la respuesta es No, el rediseño es obligatorio.												
1	1	5	S	N	N	S	N	N	N			
1	b	3	S	N	N	N	N	N	N			
En estos casos, las consecuencias de la falla son puramente económicas y no se pudo encontrar una tarea proactiva apropiada. Como resultado, la decisión "a falta de" inicial es no realizar mantenimiento programado, pero el rediseño puede ser deseable .												

Figura 2.40. Las preguntas "a falta de"

2.1.8.1.4. Tarea propuesta

Si durante el proceso de toma de decisiones se ha seleccionado una tarea proactiva o una tarea de búsqueda de falla, debe registrarse la descripción de la tarea en la columna titulada "tarea propuesta". Lo ideal es que la tarea sea descrita con el mismo detalle y precisión en la hoja de decisión como en el documento que se le entregará a la persona que deba realizar la tarea.

2.1.8.1.5. Intervalo inicial

Los intervalos de tareas son registrados en la hoja de decisión en la columna de "Intervalo Inicial", los mismos que se basan en lo siguiente:

- Los intervalos de las tareas a condición están determinados por el *intervalo P-F*.
- Los intervalos de las tareas de reacondicionamiento programado y de sustitución cíclica dependen de la vida útil del elemento en consideración.
- Los intervalos de las tareas de búsqueda de fallas están determinados por las *consecuencias de la falla múltiple*, que determina la disponibilidad necesaria, y el *tiempo medio entre ocurrencias de la falla oculta*.

Al completar la Hoja de Decisión, se debe registrar cada intervalo de tarea de acuerdo a sus propios méritos, es decir, sin referencia a otras tareas.

2.1.8.1.6. *A realizarse por*

La última columna en la hoja de decisión se utiliza para anotar quién debe hacer cada tarea. El proceso RCM considera este tema para un modo de falla a la vez, no aborda el tema con ninguna idea preconcebida acerca de quién debe (o no debe) hacer el trabajo de mantenimiento. Simplemente pregunta quién es competente y confiable como para realizar correctamente *esta* tarea.

2.1.9. IMPLEMENTANDO LAS RECOMENDACIONES DE RCM

2.1.9.1. **Implementación – Los pasos clave**

Como se anotó anteriormente, la aplicación correcta del proceso RCM concluye completándose las hojas de decisión. Estas detallan una cantidad determinada de *tareas rutinarias* que requieren ser hechas a intervalos regulares para asegurar que el activo continúe haciendo aquello que sus usuarios quieren que haga, junto con las acciones “*a falta de*” que deben adoptarse si no puede encontrarse una tarea rutinaria adecuada.

La gente que participa de este proceso aprende y logra comprender en profundidad el funcionamiento del activo y de qué manera falla. Esto hace que frecuentemente, los participantes cambien su forma de hacer las cosas, con lo que por lo general, se obtienen mejoras sensibles en el rendimiento del activo. De cualquier forma, para obtener los máximos beneficios a largo plazo de RCM, deben seguirse ciertos pasos sobre una base formal para implementar las recomendaciones que surjan del análisis. Estos deberían asegurar que:

- Todas las recomendaciones sean aprobadas formalmente por aquellos gerentes que sean los responsables finales del activo
- Todas las tareas de rutina estén descritas de forma clara y consistente
- Todas las acciones de cambio a realizar por única vez (los diseños, la manera en que el activo es operado o la capacidad de operadores y gente de mantenimiento) sean identificadas e implementadas correctamente

- Los cambios en las tareas de rutina y en procedimientos operativos sean incorporados en el grupo de tareas apropiado
- Los grupos de tareas y las acciones de cambio a realizar por única vez sean implementadas. Específicamente, esto implica:
 - ✓ La incorporación de los grupos de tareas en sistemas que aseguren que éstas serán hechas correctamente, por la gente adecuada y en el momento correcto
 - ✓ El asegurar que toda falla que se detecte será tratada de manera diligente.

Estos pasos están resumidos en la Figura 2.41.

2.1.9.2. **La Auditoría de RCM**

Si se aplica correctamente, el proceso RCM provee la estructura más robusta disponible actualmente para la formulación de estrategias de administración de activos. Estas estrategias inciden profundamente sobre la seguridad, la integridad ambiental y el bienestar económico de la organización que utiliza los activos. Sin embargo, si a pesar de los mejores esfuerzos de las personas que aplican el proceso, ocurre una falla catastrófica, todas las decisiones tomadas con RCM serán sometidas a una profunda y a veces muy controvertida revisión. Debido a lo cual, cualquier organización que utiliza RCM debe tener mucho cuidado en asegurarse que la gente que lo aplica sepa bien lo que está haciendo, y en estar satisfechos que sus decisiones son sensatas y defendibles. De ahí que el último paso del proceso es conocido como Auditoría de RCM, la cual implica una revisión formal de los contenidos de las hojas de información y de decisión de RCM.

2.1.9.2.1. *Quién debe hacer la auditoría*

Si algo realmente malo llegara a ocurrir, lo gerentes tienen la responsabilidad final sobre el activo, por lo que las Auditorías de RCM deben ser llevadas a cabo por alguien en representación directa del gerente (todo aquel que lleve a cabo las auditorías debe estar altamente capacitado en RCM).

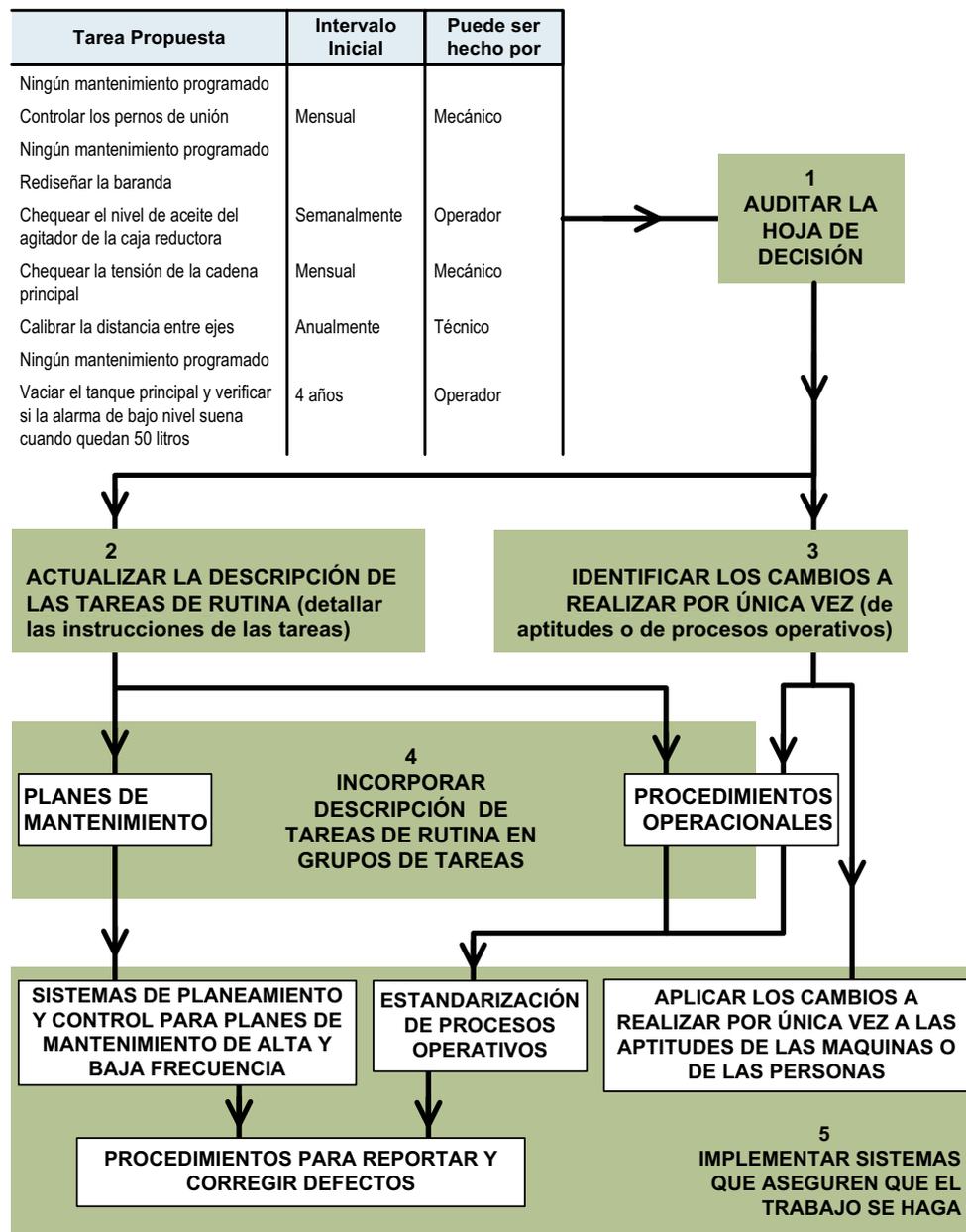


Figura 2.41. Después de RCM

Si el auditor no está de acuerdo con cualquier resultado o conclusión, debe discutir el asunto con la gente que llevó a cabo el análisis. En este punto, los auditores deben estar preparados para aceptar que ellos también pueden estar equivocados (En la mayoría de los casos, no más del 5% de las decisiones son cuestionadas).

2.1.9.2.2. *Cuándo debe realizarse la auditoría*

Una vez que el análisis haya sido completado, deben llevarse a cabo las auditorías tan pronto como sea posible (preferiblemente dentro de las dos semanas subsiguientes), por tres razones:

- La gente que realizó el análisis está ansiosa por ver los resultados de sus esfuerzos puestos en práctica (si se hace muy lentamente, comienza a perder interés, y peor aún, comienza a cuestionar el hecho de que se los haya involucrado).
- La gente todavía recuerda claramente porqué tomaron cada decisión
- Cuanto antes se implementen las decisiones, antes la organización obtendrá los beneficios del proceso.

Cuando se llega a un acuerdo sobre todos los puntos del análisis, se implementan las decisiones.

2.1.9.2.3. *Qué implica la auditoría*

Un análisis RCM necesita ser auditado desde el punto de vista del método y del contenido. Cuando se revisa el método aplicado, el auditor verifica que el proceso RCM haya sido aplicado correctamente. Cuando se revisa el contenido, el auditor verifica que se haya reunido la información correcta y que se hayan sacado las conclusiones correctas, ambas cosas desde el punto de vista del activo y del proceso del que forman parte. Las cuestiones del proceso RCM que por lo general necesitan ser atendidas son las siguientes:

- Nivel de análisis
- Funciones
- Fallas funcionales
- Modos de falla
- Efectos de la falla
- Evaluación de las consecuencias
- Selección de tareas

- Intervalo inicial.

2.1.9.3. Descripción de tareas

Antes que cualquiera de las tareas propuestas llegue a manos de quien debe realizarlas, deben ser descritas con el detalle suficiente para que no quede ninguna duda acerca de lo que debe ser hecho. Sin duda alguna, el grado de detalle que se requiere está influido por la experiencia y las habilidades generales de las personas involucradas en su realización. De cualquier manera, hay que tener en mente que cuanto menor detalle se tenga en la descripción de la tarea, mayor es el riesgo de que alguien olvide hacer un paso importante o que elija hacer una tarea errónea o ambas cosas a la vez. En este contexto, se debe tener un cuidado especial en la descripción de tareas de búsqueda de fallas cuando ésta involucra la simulación de una situación de peligro para testear el funcionamiento de un mecanismo de protección. La descripción de las tareas también debe explicar la acción a seguir si se encuentra algún defecto.

2.1.9.3.1. Información básica

Además de una clara descripción de la misma, el documento en el que se lista la tarea debe establecer claramente lo siguiente:

- Una descripción del activo al cual se le realiza la tarea junto con el número del mismo en caso de ser necesario.
- Quién debe hacer la tarea (operador, electricista, instrumentista, técnico, etc.).
- La frecuencia con la cual se debe hacer la tarea.
- Si el equipo debe detenerse (y cómo) y/o aislarse mientras se hace la tarea, junto con cualquier otra clase de medida de seguridad que deba tomarse
- Herramientas especiales y repuestos prescritos. Listándose estos ítems se pueden ahorrar muchas idas y vueltas improductivas una vez comenzada la tarea.

2.1.9.3.2. *ISO 9000 y RCM*

El objetivo primordial de RCM es identificar qué tareas debe hacer la gente; por otro lado, el aporte principal dado por los sistemas de aseguramiento de calidad como ISO 9000 es definir tan claramente como sea posible aquellas tareas que la gente debe hacer para minimizar la posibilidad de error.

Por lo tanto, el proceso de transferir las tareas desde la hoja de decisión de RCM a documentos para los usuarios finales puede verse como el punto en el cual el output del análisis RCM se vuelve el input del procedimiento de documentación de ISO 9000. Esto sugiere que si se planea aplicar ambas iniciativas, tiene más sentido aplicar primero RCM.

2.1.9.4. **Implementando cambios a realizar por única vez**

Al finalizar un típico análisis RCM, no es raro encontrar que entre el 2 y el 10% de los modos de falla implican un rediseño. Una vez que sean aceptados por los auditores, estos cambios deben implementarse tan rápido y responsablemente como sea posible. Los puntos fundamentales a considerar en cada una de las tres opciones que implica un rediseño son:

2.1.9.4.1. *Cambios en la configuración física*

Todas las modificaciones deben ser: justificadas apropiadamente, diseñadas correctamente por ingenieros cualificados adecuadamente, implantadas adecuadamente y, dirigidas adecuadamente.

2.1.9.4.2. *Cambios en la manera en que se opera la planta*

Los cambios a realizarse por única vez en la manera en que se debe operar la planta se manejan de la misma manera que las tareas rutinarias que se incorporan en los procesos operativos.

2.1.9.4.3. *Cambios en las capacidades de las personas*

El proceso RCM revela frecuentemente ciertos modos de falla causados por deslices u omisiones de parte de los operarios o gente de mantenimiento (errores humanos basados en las capacidades). Esto se vuelve visible inmediatamente a cualquier operario o persona de mantenimiento que participe

directamente del proceso, haciendo que modifique apropiadamente su comportamiento tan pronto como aprende qué es lo que está haciendo mal.

Para asegurar que la gente que no participó directamente del proceso adquiera las capacidades pertinentes, será necesario revisar o extender los programas de capacitación existentes, o desarrollar nuevos programas.

2.1.9.5. Grupos de tareas

Una vez que los procedimientos de mantenimiento hayan sido completamente especificados, necesitan ser agrupados de modo que puedan ser programados y organizados sin demasiada dificultad, y de manera que puedan ser presentados a la gente que ejecutará las tareas de manera prolija y compacta. Esto puede hacerse de dos maneras:

- Los procedimientos de mantenimiento de alta frecuencia que serán hechos por los operadores pueden incorporarse directamente a los procedimientos operativos del equipo
- El resto de las rutinas de mantenimiento son agrupadas en planes y listados por separado.

2.1.9.5.1. Procedimientos operativos estándar

Cualquier cambio que sea necesario realizar en la forma en que se opera el activo debe documentarse dentro de los procedimientos operativos estándar, o POEs (en los casos en los que todavía no existan dichos POEs, será necesario desarrollarlos para asegurarse que los cambios sean implementados). En muchos casos, la manera más simple y económica de manejar las tareas de alta frecuencia son los POEs a realizar por los operadores.

Como regla, solamente deberían integrarse a los procedimientos operativos las tareas que deben hacerse a intervalos no mayores a una semana. Las tareas que debe realizar el operador a intervalos mayores se deben agrupar en planes aparte y programarse, organizarse y controlarse de la misma manera que los planes de mantenimiento.

2.1.9.5.2. Planes de mantenimiento

Un plan de mantenimiento es un documento que lista un grupo de tareas de mantenimiento que debe realizar una persona con un nivel de conocimientos específico en un activo especificado y con una frecuencia especificada.

Compilar los planes de mantenimiento desde las hojas de decisión de RCM es un proceso bastante directo. De cualquier manera, es necesario tener en cuenta algunos factores adicionales.

2.1.9.5.2.1. Consolidación de frecuencias

Cuando en el diagrama de decisión aparece un rango muy amplio de intervalos de tareas, éstos deben consolidarse en un número menor de grupos de tareas cuando se compilan los planes de trabajo basados en las hojas de trabajo. La Figura 2.42 da un ejemplo extremo de la variedad de intervalos de tareas que pueden aparecer en una hoja de decisión, y cómo pueden consolidarse en un número menor de frecuencias en los planes de mantenimiento.

Intervalos de las tareas en las hojas de decisión	Intervalos en los planes de mantenimiento
Diario	Diario
Semanal	Semanal
2 semanas	
Mensual	Mensual
6 semanas	
2 meses	
3 meses	3 meses
4 meses	
6 meses	6 meses
9 meses	
12 meses	12 meses

Figura 2.42. Frecuencias de tareas consolidadas

Las tareas más costosas, en términos del costo directo y de la cantidad de tiempo muerto necesario para hacerlas, tienden a determinar los intervalos básicos de los planes. Si se cambia la frecuencia de una tarea, debe siempre incorporarse al plan con una frecuencia mayor. Los intervalos de las tareas nunca

deben incrementarse arbitrariamente, ya que haciendo esto puede llegar a moverse la frecuencia de una tarea a condición fuera del intervalo P-F para esa falla o, puede moverse una tarea de reacondicionamiento o sustitución cíclica más allá del fin de la vida útil de ese componente.

2.1.9.5.2.2. Contradicciones

Cuando un plan de baja frecuencia incorpora un plan de alta frecuencia, es atinado reescribir los planes para evitar que surjan contradicciones. Demasiadas contradicciones y anomalías de este tipo erosionan rápidamente la credibilidad del sistema ante los ojos de la gente que hace el trabajo.

2.1.9.5.2.3. Incorporando tareas

Cuando se compilan planes, por lo general existe la tentación de empezar a agregar tareas al plan una vez que está completo. Esto debe evitarse por las siguientes razones:

- Las tareas extra aumentan la carga de trabajo de rutina. Si se agregan demasiadas tareas, la carga de trabajo se incrementa al punto que o no hay suficiente mano de obra para hacer todas las tareas o que el equipo no puede ser cedido por el tiempo requerido para hacerlas o ambas cosas a la vez
- La gente que hace las tareas incluidas en los planes se da cuenta rápidamente que dichas tareas agregadas no son estrictamente necesarias, y por lo tanto todo el plan no es estrictamente necesario. Como resultado de esto, comienzan a buscar razones para no hacer el plan. Una vez que las encuentran, las tareas originales tampoco se hacen y todo el programa de mantenimiento comienza a quedar de lado.

2.1.9.6. Sistemas de planeamiento y control

Una vez que las tareas se clasifican en grupos de trabajo equilibrados, el próximo paso es establecer sistemas de planeamiento y control que aseguren que sean realizados por la persona que corresponda en el momento adecuado.

2.1.9.6.1. *Programas de Mantenimiento de Alta y Baja Frecuencia*

Un factor importante que influye en el diseño de los sistemas de planeamiento y control es la frecuencia de los programas. En particular, los programas de alta y baja frecuencia se manejan de manera diferente ya que los trabajos que contiene cada uno al igual que sus horizontes de planeamiento difieren.

Se definen como **Programas de alta frecuencia** aquellos que se realizan con intervalos de hasta una semana. Estos programas generalmente consisten en tareas a condición y de búsqueda de fallas simples. Tienen un bajo contenido de trabajo y por lo tanto pueden hacerse rápidamente. La mayoría pueden llevarse a cabo mientras la planta está funcionando, con lo que pueden hacerse casi en cualquier momento. Estos dos factores indican que el sistema de planeamiento asociado puede ser muy simple. No obstante, los programas de alta frecuencia generalmente son muchos, con lo que si su administración no se planea cuidadosamente se puede ir de las manos fácilmente. Pero, al ser las tareas de alta frecuencia la columna vertebral de un mantenimiento de rutina exitoso, se debe encontrar la manera de asegurar que se lleven a cabo sin crear una carga administrativa excesiva.

Los **Programas de baja frecuencia** son aquellos que se hacen con intervalos de un mes o más. Sus horizontes de planeamiento más largos los hacen menos manejables para los sistemas de planeamiento simples como los usados para los programas de alta frecuencia. Por lo general implican un trabajo mayor, con lo que se necesita más tiempo para realizarlos y por lo general debe detenerse la planta mientras se están llevando a cabo. Como resultado, necesitan sistemas de planeamiento y de control más complejos.

A continuación se detallan algunas opciones que podrían usarse para administrar ambos tipos de programas.

2.1.9.6.2. *Programas realizados por los Operarios*

Desde el punto de vista del mantenimiento, el atributo más valioso de los operarios es que están cerca del equipo durante mucho tiempo, lo que les pone en una situación ideal para realizar muchas de las tareas a condición y de

búsqueda de fallas. Éstas por lo general son tareas de muy alta frecuencia – algunas serán diarias o de hasta una o dos veces por turno – por lo que se debe tener mucho cuidado para que el sistema administrativo asociado se mantenga lo más simple posible. Los sistemas simples de aviso que pueden usarse para las tareas de los operarios en lugar de checklist formales, incluyen:

- Incorporar los controles de mantenimiento dentro de los procedimientos operativos estándar POEs.
- Instalar el programa permanentemente en una pared o en la cabina de control, donde los operarios lo puedan ver fácilmente
- Capacitar a los operarios de manera tal que las inspecciones se vuelvan algo natural (una forma muy riesgosa de abordar el tema).

Los checklist formales sólo debieran ser usados para el chequeo de los operadores cuando las consecuencias de las fallas es probable que sean particularmente severas, y existan razones para dudar si las tareas van a ser realizadas sin un recordatorio formal.

2.1.9.6.3. Programas y Controles de calidad

Cada vez más estándares de funcionamiento incorporan estándares de calidad del producto, por lo que cada vez se pueden descubrir más fallas potenciales y funcionales a través del control de calidad del producto. Los puntos a considerar para su utilización son:

- Las inspecciones de calidad deben ser consideradas como fuentes válidas y valiosas de información sobre el mantenimiento.
- Deben tomarse las medidas necesarias para asegurar que las fallas potenciales relacionadas con la calidad son atendidas tan pronto como son descubiertas.

2.1.9.6.4. Programas de alta frecuencia realizados por el personal de mantenimiento

Muchas de las tareas de alta frecuencia tienen que ser realizadas por el personal de mantenimiento, en cuyo caso necesitan ser planeadas más formalmente que los chequeos de los operarios, ya que el personal de

Cuando las tareas de alta frecuencia requieran que se tomen lecturas, tanto manual como electrónicamente, se deberá emplear alguna de las siguientes alternativas:

- Desarrollar un documento especial para todas las lecturas en cada sección, y adjuntar este documento al checklist para esa sección cada semana.
- Usar una persona para realizar este tipo de mediciones en toda la planta.
- Pedir a la gente que realiza las mediciones que sólo registren en la columna de observaciones aquellas medidas que están fuera de los límites aceptables.
- Automatizar el proceso de registro.

2.1.9.6.4.1. Emitiendo programas de alta frecuencia

Una semana antes de su realización, se le emite al mantenedor el checklist correspondiente. Preferentemente, debe ser la primera actividad que haga la persona cada día. Para la ejecución exitosa de un checklist el mantenedor debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Si la persona de mantenimiento no puede completar un día las tareas planeadas, las mismas se hacen al día siguiente. Si continuamente no puede completar los controles prescritos es porque algo está mal y se debe estudiar la situación
- La persona de mantenimiento registra cualquier falla potencial o funcional en la columna de observaciones del checklist y no en los programas mismos.
- La persona de mantenimiento, si es su responsabilidad, inicia la acción correctiva al final de cada ronda diaria
- Como en el caso de los operarios, es importante que se realice una acción determinada o que se le explique al mantenedor porqué dicha acción no es necesaria o porqué se pospone, para que los mantenedores no pierdan interés en el sistema.

- Al final de cada ciclo, se puede guardar el checklist completo como un registro de que se hicieron las tareas, con lo que no es necesario reingresarlos en un sistema de registros históricos.

2.1.9.6.4.2. Controlando los programas de alta frecuencia

Uno de los problemas asociados a la utilización de checklist es que la gente tiende a indicar que ha realizado una tarea cuando en realidad no lo ha hecho. Para evitar este problema, los supervisores deberían llevar a cabo re inspecciones al azar, lo cual implica hacer los programas de mantenimiento de los checklist junto con la persona que los hace normalmente. Si el checklist no está hecho correctamente, las fallas no reportadas se vuelven aparentes rápidamente, y el supervisor toma la acción correspondiente.

2.1.9.6.5. Programas de baja frecuencia hechos por el personal de mantenimiento

Se pueden establecer programas de baja frecuencia basados en el tiempo transcurrido y basados en el tiempo de funcionamiento, pero el horizonte a largo plazo asociado con este tipo de planes implican que los pasos a seguir para planearlos, organizarlos y controlarlos son llevados a cabo por separado. Es más, los procedimientos usados para establecer programas basados en el tiempo transcurrido difieren mucho de aquellos usados para programas basados en el tiempo de funcionamiento, pero se pueden usar procedimientos similares para organizar y controlar ambos tipos de programas.

2.1.9.6.5.1. Planeamiento basado en el tiempo transcurrido

Los principios del planeamiento basado en el tiempo transcurrido son bien conocidos, y son usados para diversos propósitos además de la planificación del mantenimiento. Para programas de baja frecuencia, el planeamiento basado en el tiempo transcurrido generalmente se basa en una planilla con un horizonte de planeamiento generalmente de un año, dividido en 52 semanas. No obstante, cuando se establezca este tipo de sistemas, téngase en cuenta que algunas tareas, en particular las de búsqueda de fallas, pueden tener ciclos de tiempo de hasta 10 años, y el horizonte de planeamiento de cualquier sistema de planeamiento asociado debe acomodar dichas tareas. También debe tomarse en

cuenta que estos programas casi siempre implican la detención de los equipos; por lo que es necesario considerar lo siguiente:

- Picos y valles en el ciclo de producción. Los programas que consumen más tiempo deben planificarse para los períodos de menor actividad para minimizar su impacto sobre las operaciones
- Dos máquinas que requieren el mismo recurso especial al mismo tiempo
- Casos en los que no es posible realizar el programa si al mismo tiempo no se detienen otras máquinas. Esto se aplica especialmente a equipos que brindan servicios como producción de vapor y aire comprimido.

2.1.9.6.5.2. Planeamiento basado en el tiempo de funcionamiento

El planeamiento basado en el tiempo de funcionamiento involucra los siguientes pasos:

- Se registra la cantidad de ciclos que cada máquina ha realizado en cada período (estos pueden estar medidos en términos de tiempo, distancia recorrida, unidades producidas, etc.).
- Estos registros son volcados a un sistema de planeamiento.
- Se actualiza la cantidad total de horas de funcionamiento acumuladas desde que se hizo el último programa.

Los sistemas de planeamiento basados en el tiempo de funcionamiento se prestan fácilmente al uso de computadoras ya que demandan procesar y guardar grandes cantidades de datos. El dinamismo de los sistemas de tiempo de funcionamiento hace además que tengan menos políticas restrictivas que los sistemas de tiempo transcurrido.

2.1.9.6.5.3. Organizando programas de baja frecuencia

En la mayoría de sistemas de planeamiento, se comienza a organizar los programas de baja frecuencia la semana anterior a que los programas venzan. El proceso de organización generalmente contiene los siguientes elementos:

- Se prepara un listado que muestra los programas que vencen la semana siguiente. Están generalmente separados por especialidad y por sección de planta.
- Se llevan a cabo reuniones con el departamento de operaciones para acordar los días y los horarios en los cuales se van a realizar los programas (especialmente para aquellos que implican la detención del equipo).
- Se publican los programas para cada supervisor, quien planea quién los realizará y coordinará para disponer de cualquier otro recurso que fuera necesario, como haría para cualquier otro trabajo de mantenimiento.

2.1.9.6.5.4. Controlando los programas de baja frecuencia

Los programas de baja frecuencia están sujetos a los mismos controles de funcionamiento que cualquier otro tipo de trabajo de mantenimiento. Esto se aplica al tiempo que toma hacer los programas, estándares de mano de obra, etc.

Además se debe considerar que el sistema de planeamiento debe indicar cuándo se vencen los programas y, que estos programas de mantenimiento deben repasarse continuamente a la luz de las circunstancias cambiantes (especialmente las circunstancias que afectan las consecuencias de las fallas) y nuevas informaciones.

2.1.9.7. Reportando Defectos

Además de asegurar que las tareas se hagan, también debemos asegurarnos que cualquier falla potencial que se encuentre sea rectificada antes que se vuelva una falla funcional, y que las fallas funcionales ocultas sean rectificadas antes que tengan posibilidades de ocasionar una falla múltiple. Esto significa que toda persona que pudiera descubrir una falla potencial o funcional debe tener acceso irrestricto a un procedimiento que sea simple, confiable y directo para reportarlas de inmediato a quien los deba reparar.

Esta comunicación tiene lugar instantáneamente si la persona que opera la máquina también es la persona que la mantiene. La velocidad y la precisión de la respuesta a los defectos que pueden ser detectados bajo estas circunstancias son una de las principales razones por las que la gente que opera las máquinas

también debe estar capacitada para mantenerlas (o viceversa). Un segundo beneficio de este método es que los sistemas formales de reporte de defectos se necesitan solamente para fallas en las que el operario/persona de mantenimiento es incapaz de arreglarla por sí solo.

Si no es posible esta estructura organizacional o no es práctica, otra opción para asegurar que los defectos sean atendidos rápidamente es destinar personal de mantenimiento con dedicación permanente a un activo específico o a un grupo de activos. No solamente hace que esta gente conozca mejor las máquinas, lo que mejora su capacidad de diagnóstico, sino que también hace que la velocidad de respuesta tienda a ser mayor de lo que podría ser si trabajaran en un taller centralizado. También es posible mantener simple e informal el sistema de reportes de defectos.

Si no es posible organizar ninguna clase de soporte de mantenimiento compacto, se vuelve necesario implementar un sistema de reporte de defectos formal. Básicamente, estos sistemas permiten que cualquier persona informe por escrito (electrónica o manualmente) al departamento de mantenimiento respecto de la existencia de fallas potenciales o funcionales. Los criterios que deben dirigir esta clase de sistemas siempre deben ser la simplicidad, la accesibilidad y la velocidad.

Algo de vital importancia en el uso de los sistemas de reporte de defectos formal es que la gente debe estar adecuadamente motivada para usarlos. Esto significa que los defectos que se reportan deben ser atendidos de inmediato, o se debe decir al usuario por qué no se lleva a cabo ninguna acción. Nada va a ser tan nocivo para este tipo de sistemas como que se reporte un defecto y aparentemente no se haga nada.

2.1.10. APLICACIÓN DEL PROCESO RCM

En la mayoría de las industrias, los registros históricos pocas veces son suficientemente comprensivos como para usarse como fuentes de información confiable que permitan responder las siete preguntas del proceso RCM. De modo que la información requerida aún tiene que obtenerse de algún lugar, no es extraño que “ese lugar” pueda ser “alguien” – alguien que tiene un conocimiento y

experiencia profundos sobre el activo en consideración –. Además, hay ocasiones en las que el proceso de búsqueda de información revela puntos de vista sustancialmente diferentes que deben ser consensuados antes de tomar decisiones.

Por lo que se ha demostrado que es imposible para una persona, o aún para un grupo de personas de un departamento, aplicar el proceso RCM por sí mismos. La variedad de información que se necesita y la diversidad de personas a las cuales se les solicitará, sugiere que puede hacerse solamente sobre la base de una amplia consulta y cooperación, especialmente entre personal de producción/operaciones y mantenimiento. La manera más eficaz de organizar esto es convenir con el personal clave para que aplique el proceso en pequeños grupos, denominados *Grupos de revisión RCM*.

Para una exitosa aplicación del proceso RCM, previo a la conformación de los grupos de revisión RCM, es importante que se parta de una planificación.

2.1.10.1. **Planeamiento**

Si es aplicado correctamente, RCM logra grandes mejoras en la efectividad del mantenimiento, y a menudo lo hace sorprendentemente rápido. Sin embargo, la aplicación exitosa de RCM depende de un meticuloso planeamiento y preparación. Los elementos centrales del proceso de planeamiento son:

- Decidir cuáles activos físicos se beneficiarán más con el proceso RCM, y exactamente de qué manera lo harán.
- Evaluar los recursos requeridos para la aplicación del proceso a los activos seleccionados.
- En los casos en los que los beneficios justifican la inversión, decidir detalladamente quién realizará y quién auditará cada análisis, cuándo y dónde, y hacer los arreglos para que dichas personas reciban el entrenamiento apropiado.
- Asegurar que el contexto operacional de cada activo físico esté claramente comprendido.

2.1.10.2. Los Grupos de Revisión RCM

Un grupo típico de revisión RCM debería incluir *al menos* a una persona de la función de mantenimiento, y a una de la función de operaciones. La antigüedad de los miembros del grupo es menos importante que el hecho de tener un conocimiento profundo del activo físico bajo revisión. En general, el grupo de revisión debería incluir al personal indicado en la Figura 2.44.



Figura 2.44. Un grupo típico de revisión RCM

En la práctica, los lugares de cada grupo no tienen que completarse exactamente por el mismo personal que el que muestra la Figura 2.44. El objetivo es conformar un grupo que pueda proveer toda, o al menos la mayor parte, de la información necesaria para el análisis. Estas personas son aquellas que tienen un conocimiento más amplio y una experiencia mayor sobre el activo y sobre los procesos de los que forma parte. En general, debería consistir de no menos de cuatro y no más de siete personas, siendo ideal cinco o seis. El grupo debe incluir los mismos individuos durante todo el análisis del activo.

Los especialistas sólo necesitan asistir a las reuniones en las que se discute su especialidad y, pueden serlo en:

- Alguna característica del proceso, generalmente en temas que tienden a ser peligrosos o medioambientales sensibles.
- Una forma típica de falla, como la fatiga o la corrosión.
- Un tipo de equipo específico, como los sistemas hidráulicos.

- Algún aspecto de la tecnología de mantenimiento, como el análisis de vibraciones o la termografía.

2.1.10.2.1. *Qué hace cada grupo*

El objetivo de cada grupo es usar el proceso RCM para determinar los requisitos de mantenimiento de un activo físico específico o una parte del proceso en particular. Bajo la conducción de un Facilitador, el grupo analiza el contexto en el cual está operando el activo, y luego completa la Hoja de Información; luego usando el Diagrama de Decisión RCM se decide cómo tratar cada uno de los modos de falla indicados en la hoja de información. Finalmente sus conclusiones se registran en las Hojas de Decisión.

A través de todo el proceso la consigna clave es *el consenso*, esto es, la aceptación por parte de todos los miembros del grupo de las conclusiones que se registran. A cada miembro del grupo se lo alienta en cada etapa del proceso a contribuir en todo lo que pueda, como se muestra en la Figura 2.45, para ir construyendo la Base de datos RCM. No debería registrarse nada hasta que haya sido aceptado por todo el grupo.

Este trabajo se hace en una serie de reuniones que duran cada una alrededor de tres horas, y cada grupo se reúne en promedio de uno a cinco veces por semana. El activo debe ser subdividido y asignado a los grupos de tal manera que cualquiera de ellos pueda completar en su totalidad el proceso en no menos de cinco y no más de quince reuniones.

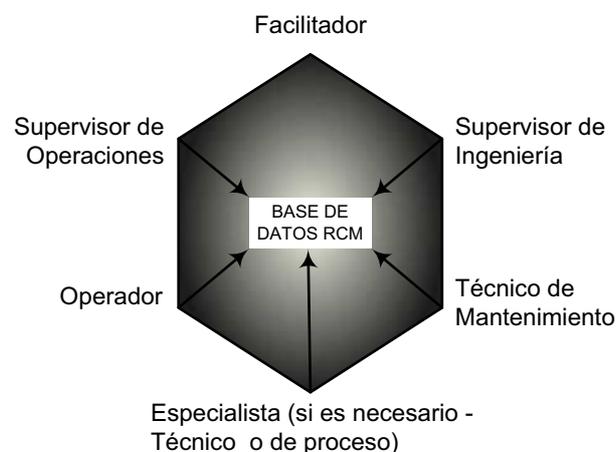


Figura 2.45. El flujo de información en la base de datos RCM

2.1.10.2.2. Qué obtienen los participantes del proceso

El flujo de información que tiene lugar en estas reuniones no está solamente en la base de datos; cuando cualquier miembro del grupo efectúa una contribución, inmediatamente los otros aprenden tres cosas:

- Más sobre el activo, más del proceso de que forma parte y más sobre lo que debe hacerse para mantenerlo trabajando. Como resultado, en lugar de tener cinco o seis personas que saben cada una un poco – a menudo sorprendentemente muy poco – del activo en revisión, la organización gana cinco o seis expertos en el tema.
- Más sobre los objetivos y metas de sus colegas. En particular, el personal de mantenimiento aprende más sobre lo que sus colegas de producción tratan de obtener, mientras que el personal de producción aprende mucho más sobre lo que el personal de mantenimiento puede – y no puede – ayudar a realizar.
- Más sobre las fortalezas y debilidades individuales de cada miembro del grupo, lo que tiene un efecto más saludable sobre el respeto mutuo y la comprensión recíproca.

Esto transforma a un conjunto de individuos completamente diferentes provenientes de dos disciplinas notoriamente opuestas (operaciones y mantenimiento) en un equipo. Además, como cada uno de ellos toma parte en la definición de los problemas e identificación de las soluciones, promueve en los participantes un mayor sentido de pertenencia.

Este proceso ha sido descrito como “aprendizaje simultáneo”, puesto que los participantes identifican lo que necesitan aprender al mismo tiempo que lo asimilan. Una limitación de este sistema de aprendizaje grupal es que a menos que se tomen acciones específicas para distribuir la información resultante, las únicas personas que se benefician directamente son los miembros del grupo. Hay dos maneras de superar este problema:

- Asegurar que cualquier persona en la organización pueda tener acceso a la base de datos en cualquier momento

- Usar la información del proceso RCM para desarrollar cursos normales de entrenamiento.

2.1.10.3. **Facilitadores**

La función primaria de un Facilitador de RCM es ayudar a la aplicación de la filosofía RCM efectuando preguntas a un grupo de personas seleccionadas por su conocimiento de un activo o proceso específico, asegurando que el grupo tenga consenso en las respuestas, y registrando las mismas.

De todos los factores que influyen en la calidad final del análisis, la habilidad del Facilitador es la más importante. Esto se aplica tanto a la calidad técnica del análisis como al ritmo en el que se completa el análisis y a la actitud de los participantes hacia el proceso RCM.

Para lograr un estándar razonable un Facilitador RCM debe ser competente en 45 áreas clave, dichas habilidades pueden ordenarse dentro de las cinco categorías siguientes:

2.1.10.3.1. Aplicar la Lógica RCM

El Facilitador debe asegurar que el grupo de revisión aplica correctamente el proceso RCM. Esto implica que todas las preguntas que componen el proceso son efectuadas correctamente, en la secuencia correcta, que son comprendidas correctamente por todos los miembros del grupo y que el mismo logre consenso acerca de las respuestas.

2.1.10.3.2. Dirigir el Análisis

En general, las siguientes decisiones las toma el Facilitador y/o hace el trabajo por sí mismo:

- *Preparar las reuniones:* antes de la primera reunión el Facilitador debe recolectar la información básica sobre el activo/proceso; esto incluye diagramas de flujo, manuales de operación, registros históricos – si los hay – y diagramas de los circuitos eléctricos, hidráulicos y neumáticos.
- *Seleccionar los niveles de análisis / definir los límites:* el equipo a ser analizado por cada grupo de revisión deberá ser identificado durante la

etapa de planeamiento y será el Facilitador quien tome la decisión final acerca del agrupamiento/nivel de análisis del equipo, y por lo tanto tiene que definir los límites del análisis.

- *Tratar apropiadamente los modos de falla complejos:* al listar los modos de falla decidir cuándo elegir cada una de las cuatro formas de documentar los mismos.
- *Saber cuándo dejar de listar modos de falla:* saber cuándo finalizar el listado de los modos de falla que pudieran causar cada falla funcional es uno de los elementos clave de una facilitación exitosa, y requiere un juicio cuidadoso.
- *Interpretar y registrar las decisiones con un mínimo lenguaje técnico:* al registrar las decisiones del grupo, el Facilitador debe asegurarse que todos los términos técnicos usados sean comprendidos por las personas que pudieran acceder al análisis.
- *Reconocer cuando el grupo no sabe:* el Facilitador tiene que reconocer entre la seguridad y la ignorancia.
- *Evitar los intentos de rediseñar el activo durante las reuniones de RCM:* los intentos de rediseñar el activo son la pérdida de tiempo más grande de las reuniones de RCM. El Facilitador simplemente debería anotar que el rediseño es obligatorio/puede ser deseable, y puede tomar nota de una sugerencia si la respuesta parece obvia.
- *Completar las Hojas de Trabajo RCM:* ya sea que se archiven de forma manual o electrónica, las Hojas de Trabajo de Información y de Decisión deberían completarse de manera tal que resulten claras y legibles.
- *Preparar un archivo de auditoría:* el Facilitador debe reunir en un documento denominado “archivo de auditoría”, además de las Hojas de Trabajo, información de apoyo suficiente – dibujos esquematizados, datos conocidos de fallas, incluso fotografías del equipo – para permitir a los auditores hacer su trabajo apropiadamente.
- *Ingresar los datos de RCM en una base de datos computarizada:* esto lo hace un digitador o el Facilitador.

2.1.10.3.3. Conducir las Reuniones

El Facilitador interactúa con los participantes de las reuniones a un nivel puramente humano, de las siguientes maneras:

- *Preparar la escena:* en la primera reunión de cada grupo, el Facilitador debe acordar con el grupo las normas básicas de las reuniones, y asegurar que cada miembro del grupo comprenda el alcance y los objetivos del ejercicio y porqué se invitó a participar a cada uno.
- *La conducta del Facilitador:* la forma como se conduce el Facilitador tiene un efecto profundo sobre la manera en que se comportan los otros miembros del grupo. En general debe tener una actitud positiva hacia el proceso, tener cuidado de preservar la dignidad de los miembros del grupo y proveer un feedback positivo para responder a contribuciones válidas.
- *Efectuar en orden las preguntas RCM:* una vez encaminadas las sesiones, el papel principal del Facilitador es efectuar las preguntas requeridas por el proceso RCM. Es esencial evitar cualquier tendencia a pasar por alto alguna pregunta o dar por sentadas las respuestas.
- *Asegurar que cada pregunta se comprenda correctamente:* el Facilitador debe asegurarse siempre que todos los miembros del grupo comprendan correctamente todas las preguntas, especialmente en las etapas iniciales del proceso.
- *Alentar a que participe cada miembro del grupo:* todo aquel que tenga algo para aportar debería hacerlo. Esto tiende a alentar a que la gente reticente participe y asegurar que las personalidades dominantes no prevalezcan en las reuniones excluyendo al resto.
- *Responder las preguntas:* los Facilitadores deben evitar lo que por lo general es una gran tentación, responder directamente las preguntas de RCM. Sin embargo, es legítimo clarificar las respuestas dudosas con preguntas adicionales.
- *Asegurar el consenso:* una de las funciones más importantes es asegurar que el grupo logre consenso, lo cual significa estar preparado para aceptar el punto de vista de la mayoría.

- *Motivar al grupo:* uno de los factores más importantes que afectan la actitud del grupo es la actitud del Facilitador, además deberá lidiar con la disminución del entusiasmo y el escepticismo, donde los miembros del grupo no creen que sus recomendaciones serán tomadas seriamente por la dirección.
- *Manejar las interrupciones apropiadamente:* el Facilitador debe manejar las interrupciones de las reuniones de manera que asegure la continuidad del análisis.
- *Orientar al grupo o a los miembros individualmente:* algunas veces es necesario que el Facilitador oriente a los individuos o al grupo en su totalidad en algún elemento de la filosofía RCM.

2.1.10.3.4. Administrar el Tiempo

RCM es un proceso que requiere el uso intensivo de recursos y es lo suficientemente exhaustivo como para que las gerencias a todo nivel tengan interés en la cantidad de tiempo y esfuerzo que requiere completar cada análisis. Los recursos requeridos para aplicar el proceso RCM y la duración de cada proyecto son profundamente afectados por el ritmo con el que los Facilitadores conducen las reuniones y la forma en que administran su tiempo fuera de las mismas. Por tanto, los Facilitadores necesitan desarrollar sus destrezas para administrar el tiempo tanto como en cualquier otro aspecto de RCM, lo cual pueden lograrlo mediante las siguientes medidas para una administración eficaz del tiempo:

- *Ritmo de trabajo:* un progreso lento significa la necesidad de tener más reuniones, lo que podría demorar la fecha de terminación del proyecto. También debe evitar la realización de reuniones sin el quórum necesario.
- *Cantidad total de reuniones efectuadas:* el número total de reuniones necesarias para realizar un análisis completo debería ser determinado en la etapa de planeamiento del proceso RCM. Por lo general, se acepta que un Facilitador complete cualquier análisis con una tolerancia en exceso que esté dentro del 20% del número estimado de reuniones.

- *Fecha real de finalización contra la fecha objetivo:* la fecha de finalización de cada serie de reuniones también debería determinarse durante la fase de planeamiento del proyecto RCM. Ningún obstáculo debería detener al Facilitador para arribar a esa fecha.
- *Tiempo empleado para preparar la auditoría:* luego que las reuniones han sido completadas el Facilitador necesita preparar un archivo para la auditoría de RCM. Dado que las recomendaciones no pueden ser implementadas hasta que hayan sido auditadas, este paso debe ser llevado a cabo tan rápido como sea posible
- *Tiempo fuera de las reuniones:* los Facilitadores también son recursos escasos y caros, de modo que tienen la obligación consigo mismos y con sus empleadores de usar su propio tiempo tan eficazmente como sea posible.

2.1.10.3.5. Administrar la Logística e Interacción con los Niveles Superiores

El Facilitador interactúa con personas (generalmente gerentes) que no son miembros de los grupos de revisión. Estas interacciones comprenden tomar decisiones, proveer información o lograr que se haga el trabajo. Por ello, los Facilitadores son juzgados sobre el progreso en esas áreas, las cuales abarcarán principalmente los siguientes aspectos:

- Preparar el proyecto RCM como un todo.
- Planear el proyecto.
- Comunicar los planes.
- El lugar de la reunión.
- Comunicar los hallazgos urgentes.
- Comunicar los progresos.
- Asegurar que se auditen las hojas de trabajo de RCM.
- Presentación a la gerencia.
- Implementación de las decisiones de RCM.
- Reuniones de reconsideración y actualización del análisis.

2.1.10.4. Estrategias de Implementación

En general, el enfoque del grupo de RCM puede aplicarse en una de las tres siguientes maneras:

2.1.10.4.1. *El Enfoque de la Fuerza de Tareas*

Las organizaciones que tienen activos o procesos que sufren problemas recurrentes con consecuencias serias, adoptan el enfoque de “fuerza de tareas” para aplicar RCM. Este enfoque implica entrenar a un pequeño grupo (la fuerza de tareas) para llevar a cabo un análisis RCM intensivo del sistema afectado. Generalmente trabajan a tiempo completo en el proyecto de revisión hasta que éste haya sido finalizado, y luego el grupo se disuelve.

Las ventajas principales de este criterio son que: es rápido, fácil de dirigir, y si tiene éxito – lo que es habitual – puede obtener ahorros sustanciales (en términos de mejoramiento del desempeño de planta) con una inversión relativamente pequeña. Las principales desventajas de este enfoque son que: no hace nada para asegurar participación y compromiso de todas las personas de la organización hacia los resultados en el largo plazo, de modo que los resultados son muchos menos probables que perduren, y dado su enfoque limitado, hace poco para fomentar las mejores prácticas en toda la organización.

2.1.10.4.2. *El Enfoque Selectivo*

La mayoría de las plantas tienen algunos activos que son más susceptibles que otros a problemas crónicos difíciles de identificar. Estos problemas generalmente se manifiestan como tiempos de parada, pobre calidad del producto, pobre calidad del servicio al cliente o costos de mantenimiento excesivos. Otras áreas pueden enfrentarse con riesgos inaceptables para la seguridad o el medio ambiente, que necesiten ser abordados en forma sistemática.

Dado que hay cientos o miles de elementos para elegir en un emprendimiento grande, lo más sensato es comenzar a aplicar una técnica con el poder de RCM en aquellas áreas en donde se encuentran los peores problemas.

Una vez tratados estos activos, se decide si RCM será utilizado para analizar otros activos con problemas menos serios, y así sucesivamente.

En la mayoría de los casos, el camino más sencillo, más rápido y más eficaz para identificar los activos físicos que están causando los problemas más serios (especialmente en términos de consecuencias de fallas) es preguntando a los usuarios.

Si los peores problemas no son evidentes inmediatamente, o si no es posible lograr consenso acerca de dónde comenzar informalmente, entonces a veces es necesario decidir dónde debe aplicarse RCM usando un criterio más formal. Esto puede realizarse en tres etapas:

- Identificar los activos “importantes”, que son los que más probablemente se beneficiarán del proceso RCM.
- Ordenar los activos en orden decreciente de importancia.
- Decidir si para activos muy similares puede usarse un criterio “patrón”.

Por lo general, las organizaciones que adoptan el enfoque selectivo, aplican RCM del 20% al 40% de sus activos.

La ventaja principal de este enfoque es que la inversión se realiza sólo cuando produce *retornos rápidos* y (generalmente) *mensurables*. Puesto que RCM se aplica sólo a parte de la instalación, *el proyecto es menos costoso* y por lo tanto *más fácil de administrar* que si se analizara la instalación por completo.

La desventaja principal de este enfoque *es que pone mucho mayor énfasis en el desempeño técnico y operativo del equipo que en la gente* de la que finalmente depende el equipo en el largo plazo (los operadores y el personal de mantenimiento).

2.1.10.4.3. El Enfoque Amplio

El tercer enfoque para la aplicación de RCM pone al menos el mismo énfasis en mejorar el conocimiento y la motivación de los individuos y perfeccionar el trabajo en equipo entre los usuarios y quienes mantienen los activos, como sobre el rendimiento de los activos mismos. Esto se hace a menudo de dos maneras:

- Analizar todos los activos del lugar en una campaña corta e intensa. En la mayoría de los casos las campañas de esta naturaleza duran de seis a dieciocho meses. Pueden estar activos simultáneamente hasta veinte y aún más grupos, trabajando bajo la dirección de tres o cuatro, hasta treinta o cuarenta Facilitadores. Tan pronto como un grupo completa el análisis de su activo o proceso, se activa un nuevo grupo. De esta manera, finaliza la campaña rápidamente y la organización disfruta de todos los beneficios igual de rápido. En realidad, este es un camino excelente para lograr cambios importantes y duraderos en el desempeño de mantenimiento para las compañías que necesitan hacerlo rápidamente. Sin embargo, es un enfoque que requiere de un uso intensivo de recursos, de modo que se necesita un planeamiento muy minucioso y mucha atención gerencial.
- Una segunda posibilidad es revisar todos los equipos del lugar, pero hacerlo en etapas. Quizás se activen cuatro o cinco grupos al mismo tiempo, trabajando bajo la dirección de uno o dos Facilitadores. Sobre esta base puede estimarse que tomaría de cinco a diez años analizar todos los equipos de una instalación grande (tres a cuatro en una más pequeña). La organización todavía obtiene todos los beneficios de RCM, pero toma mucho más tiempo el lograrlo. Este criterio podría ser visto como “algo interminable”, y por lo tanto podría resultar desmotivador.

Las desventajas principales de este criterio son: es más lento porque debe familiarizarse con la metodología RCM mucha más gente, y *es más difícil de conducir*, porque hay muchas más personas involucradas.

La ventaja principal es que asegura *un sentido mucho más amplio de pertenencia de los problemas de mantenimiento y sus soluciones* en el largo plazo. Esto no sólo mejora la motivación individual y el trabajo de equipo, sino que también asegura que los resultados del ejercicio *son mucho más propensos a perdurar* (la mejor práctica se convierte en “parte de la manera en que aquí hacemos las cosas”).

2.1.10.4.4. Decidiendo qué enfoque usar

Para aplicar RCM correctamente, se requiere un compromiso sustancial de recursos. Si se aplica el enfoque amplio, se necesita del compromiso y cooperación de una gran cantidad de personas. Como resultado, es prudente decidir que enfoque debería usarse en etapas.

Es recomendable iniciar solicitando a los gerentes que asistan a un curso introductorio de entrenamiento en RCM, para que ellos mismos evalúen qué recursos se requieren para aplicarlo y que juzguen qué beneficios potenciales ofrece en sus áreas de responsabilidad.

Si la respuesta es favorable, el paso siguiente es iniciar uno o dos proyectos piloto. Esto permite a la organización ganar experiencia de primera mano sobre la dinámica del proceso completo de RCM, lo que se obtiene, y qué recursos necesitan comprometerse para lograrlo.

Cuando el(los) proyecto(s) está(n) completo(s), los participantes están en posición de evaluar los resultados por sí mismos y decidir a cuál, dónde, y cuán rápido debería aplicarse RCM al resto de los activos de la organización.

2.2. ANÁLISIS DE COSTO BENEFICIO DE LA APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE RCM

Como se discutió en profundidad anteriormente, con la aplicación de RCM se obtienen tres resultados tangibles:

- Programas de mantenimiento a ser realizados por el departamento de mantenimiento
- Procedimientos de operación revisados para los operadores de los activos
- Una lista de áreas donde cambios de una sola vez deben ser hechos, de modo de manejar las situaciones donde los activos no pueden suministrar el estándar de funcionamiento deseado en la configuración actual.

Otros resultados menos tangibles, son que los participantes en el proceso aprenden mucho sobre cómo el activo trabaja, y también que tienden a funcionar mejor como equipo.

Alcanzar todos estos resultados requiere de mucho tiempo y esfuerzo. Sin embargo, si RCM es aplicado correctamente, rinde beneficios que por lejos superan los costos involucrados. La mayoría de las aplicaciones se repagan en un período de meses, aunque algunas se han repagado en dos semanas o menos. De hecho el RCM devenga retornos sustanciales, pero la naturaleza de estos ahorros varía mucho de una organización a otra. La gran variedad de formas en que RCM se repaga son discutidas más adelante, en el ítem 2.2.4. Para poner en perspectiva esta discusión, es necesario primero considerar las diferentes formas en que es posible medir el desempeño de la función mantenimiento.

Aquí se debe plantear la siguiente pregunta, ¿el mantenimiento debe ser orientado por costos o por resultados? Para contestar dicha pregunta se debería tomar en consideración que centrarse en los resultados implica tener una visión de largo plazo, en tanto que centrarse en los costos implica, por el contrario, tener una visión de corto plazo.

El desempeño del mantenimiento puede ser considerado desde dos puntos de vista distintos. El primero se focaliza en cuan bien el mantenimiento asegura que los activos continúen haciendo lo que sus usuarios desean que hagan. Esto es usualmente señalado como *efectividad* del mantenimiento, y es generalmente de gran interés para los usuarios o “clientes” del servicio de mantenimiento. El segundo punto de vista se concentra en cuan bien se usan los recursos del mantenimiento. Esto es usualmente señalado como *eficiencia* del mantenimiento. Es comúnmente de más interés para los gerentes que son directamente responsables del mantenimiento. Estos dos aspectos son considerados a continuación.

2.2.1. EFECTIVIDAD DEL MANTENIMIENTO

Como se concluyó anteriormente, el objetivo del mantenimiento es asegurar que todo activo físico continúe satisfaciendo las funciones pretendidas hasta el estándar de funcionamiento deseado por sus usuarios. Por tanto, cualquier evaluación sobre el cumplimiento de las metas de mantenimiento debe incluir una evaluación sobre cuán bien los activos *continúan* satisfaciendo sus funciones hasta el estándar de funcionamiento deseado.

2.2.1.1. Diferentes maneras de medir la efectividad del Mantenimiento

La función principal de cualquier planta manufacturera altamente mecanizada y completamente cargada, es producir al menos tantas unidades de productos vendibles como se esperaba de ella cuando fue construida. En este contexto, cualquier falla que reduzca la producción resulta en pérdida de ventas.

En casos como este, la medida global más simple del desempeño operacional de la planta como un todo es la **producción total del período**. Si los usuarios observan que la planta no está produciendo lo que debería estar produciendo en forma regular, no estarán satisfechos hasta que la situación se corrija.

Pero no todo estará necesariamente bien si la producción total alcanza el objetivo. Una planta que esté produciendo el número correcto de unidades puede aún estar experimentando problemas que afecten a la seguridad, la calidad del producto, los costos operativos, la integridad ambiental, el servicio al cliente y demás; por lo que todo esto debe ser medido y manejado adecuadamente. Hay algunas maneras en que podemos medir cuan efectivamente un activo está satisfaciendo sus funciones:

- *Cuán seguido falla:* este es el significado más ampliamente aceptado del término “confiabilidad”. Es usualmente medido como “tiempo medio entre fallas” (MTBF) o “tasa de fallas”.
- *Cuánto dura:* esto es usualmente definido como la “vida” o el “período de vida”, al final del cual el ítem en consideración falla y es o bien reconstruido o descartado y reemplazado por uno nuevo. Estrictamente hablando, este fenómeno es descrito como “durabilidad”.
- *Cuánto tiempo está fuera de servicio cuando falla:* esto es usualmente mencionado como tiempo “de parada” o “indisponibilidad”, y mide cuanto tiempo el ítem es incapaz de satisfacer la función establecida a satisfacción del usuario, en relación a la cantidad de tiempo que el usuario desea que lo haga.

- *Qué probabilidad tiene de fallar en el próximo período:* asumiendo que sobrevivió hasta el inicio de ese período, esta es la probabilidad condicional de falla.
- *Eficiencia:* en usos normales de negocios, el término eficiencia tiene realmente dos significados muy distintos. El primero mide resultados versus entradas, mientras que el segundo mide cuan bien algo es realizado contra cuan bien debería realizarse.

Todas estas cinco medidas son válidas, es solamente un problema de decidir cuál es la más apropiada en el contexto en consideración.

2.2.1.2. **Expectativas diferentes**

Cada función tiene asociada consigo un único conjunto de expectativas de continuidad: confiabilidad, y/o durabilidad, y/o disponibilidad y/o probabilidad de falla en el próximo período.

Como la pérdida de cada función puede ser causada por más de un modo de falla, y cada modo de falla tiene asociado una tasa de falla específica (o MTBF), y cada uno sacará a la función de servicio por una cantidad de tiempo que es específica a ese modo de falla; entonces, las características de continuidad de cualquier función serán realmente la composición de las características de continuidad de todos los modos de falla que pueden causar la pérdida de esa función. Por tanto:

- Necesitamos una comprensión adecuada de todos los modos de falla que son razonablemente probables de causar pérdida de función, de modo de ser capaces de diseñar, operar y mantener un activo de tal manera que las expectativas de efectividad que tenemos de cada función sean alcanzadas.
- No es razonable dejar al mantenedor de un activo como único responsable del logro de cualquier expectativa de continuidad. El logro de estos objetivos es también una función de cómo es diseñado, construido y operado. Por tanto, la responsabilidad por alcanzar los objetivos asociados debe ser dividida conjuntamente entre las personas responsables de todas estas funciones.

2.2.1.3. Diferentes funciones

Tal vez el más importante punto sobre la medición de la efectividad de las actividades de mantenimiento es el hecho que cada activo tiene más de una y a veces docenas de funciones. Como un único conjunto de expectativas de continuidad se asocia a cada función; entonces si un activo tiene 10 funciones, la efectividad con que este activo está siendo mantenido puede ser medida de (al menos) diez maneras diferentes.

Los puntos más importantes sobre la medida de la efectividad del mantenimiento, son:

- Cuando estamos midiendo desempeño del mantenimiento, no estamos midiendo efectividad de *equipamientos*, estamos midiendo efectividad *funcional*. La distinción es importante, porque cambiando el énfasis desde los equipos a sus funciones se ayuda a las personas – mantenedores en particular – a focalizarse en lo que el equipo *hace* más que en lo que el equipo *es*.
- Hasta lo activos más simples tienen una sorprendente gran cantidad de funciones. Cada una de estas funciones tienen un único conjunto de expectativas de desempeño. Antes que sea posible desarrollar un sistema de reporte de efectividad del mantenimiento completo e integral, necesitamos saber cuáles son estas funciones, y debemos estar preparados a establecer que piensan *los usuarios* que es aceptable o no en cada caso.
- Hay muy seguido una tendencia a focalizarse muy frecuentemente en las funciones primarias cuando se evalúa la efectividad del mantenimiento. Esto es un error, porque en la práctica funciones secundarias aparentemente triviales muy frecuentemente encierran amenazas más grandes para la organización en caso de falla que las funciones primarias.

2.2.1.4. Estándares de desempeño múltiples y el OEE

Si una función incluye múltiples estándares de desempeño, es tentador intentar desarrollar una única medida compuesta de efectividad para toda la función. Por ejemplo, la función primaria de una máquina desempeñando una

operación de conversión en una instalación de manufactura usualmente incorpora tres estándares de desempeño, como sigue:

- ✓ debe trabajar
- ✓ debe trabajar al ritmo correcto
- ✓ debe producir la calidad requerida.

La efectividad con que continúe alcanzando cada una de estas expectativas es medida por la disponibilidad, le eficiencia y el rendimiento. Esto sugiere que una medida compuesta de la efectividad con que esta máquina está satisfaciendo su función primaria en forma continua puede ser determinada multiplicando estas tres variables, como sigue:

$$\text{Efectividad global} = \text{disponibilidad} \times \text{eficiencia} \times \text{rendimiento} \quad [2.4]$$

Esta particular medida compuesta es generalmente conocida como “Efectividad global de equipos” o EGE (**OEE** - Overall Equipment Effectiveness), que se analizará a detalle más adelante. Medidas compuestas de esta clase son populares pues permiten a los usuarios evaluar la efectividad del mantenimiento de una vez. Sin embargo, estas medidas realmente sufren de numerosas desventajas, a saber:

- El uso de tres variables en la misma ecuación implica que las tres tienen el mismo peso. Este puede no ser el caso en la práctica.
- Es posible para muchos activos operar muy rápido tanto como muy lento. Sobrepassar la velocidad de un activo podría aumentar la EGE tal como se la definió antes, lo que significa que es posible obtener una aparente mejora del desempeño “global” forzando al activo a operar en un estado de falla.
- La EGE tal como se la definió antes solo es aplicable a la función primaria de cualquier activo. Esto conduce a un error, ya que los equipos por lo general tienen muchas más funciones que la función primaria, y cada una de ellas tendrá su única expectativa de desempeño. Consecuentemente, el EGE no es una medida de la efectividad “global” en absoluto, sino sólo una

medida de la efectividad con que la función primaria del activo está siendo realizada.

- Por las razones discutidas antes, empresas con mantenimiento orientado al usuario necesitan cambiar su atención de efectividad de “equipos” a efectividad de funciones. Por lo tanto si medidas de este tipo deben ser usadas, es mucho más preciso referirse a ellas como medidas de “efectividad de funciones primarias” más que “efectividad global de equipos”.

Para concluir respecto a la efectividad del mantenimiento, hay que considerar que cuando se evalúa la contribución que el mantenimiento está haciendo al desempeño de cualquier activo, la efectividad con que cada función está siendo realizada debe ser medida en forma continua. Esto requiere una clara comprensión de todas las funciones del activo, junto con una clara comprensión de qué significa cuando se dice que está “fallado”.

2.2.2. EFICIENCIA DEL MANTENIMIENTO

La eficiencia del mantenimiento mide cuan bien la función mantenimiento está usando los recursos a su disposición. Del gran número de formas en que esto puede ser hecho, las medidas de eficiencia pueden ser agrupadas en cuatro categorías: *costos de mantenimiento, mano de obra, repuestos y materiales, planificación y control.*

2.2.2.1. Costos de mantenimiento

Los costos referidos en esta parte son los costos directos de mantenimiento: mano de obra, materiales y contratistas, como opuestos a los costos indirectos asociados con un pobre desempeño de los activos.

En muchas industrias, el costo directo de mantenimiento es hoy el tercer elemento más alto de los costos operativos, atrás de materias primas y mano de obra de producción o energía. En algunos casos ha subido hasta segundo e incluso primer lugar. Como resultado, el control de estos costos se ha convertido en una prioridad principal.

Las formas más comunes en que los costos de mantenimiento son medidos y analizados son:

- Costo total de mantenimiento (real y presupuestado)
 - ✓ Para la planta entera
 - ✓ Para cada unidad de negocios
 - ✓ Para cada activo o sistema
- Costos de mantenimiento por unidad de producción
- Tasa de gastos de materiales versus mano de obra.

2.2.2.2. **Mano de obra**

Los costos de mano de obra de mantenimiento típicamente son entre un tercio y dos tercios del total de los costos de mantenimiento, dependiendo de la industria y los niveles de beneficios sociales del país considerado. En este contexto, los costos de mano de obra de mantenimiento deben incluir gastos de mano de obra contratada y los recursos que la organización está dedicando al mantenimiento, cuando los operadores realizan tareas de mantenimiento.

Algunas formas comunes de medir y analizar la eficiencia de la mano de obra de mantenimiento son las siguientes:

- Costos de mano de obra de mantenimiento (total y por unidad de producción).
- Productividad del tiempo (relación del tiempo desarrollando tareas específicas al tiempo total por el cual se paga expresado como porcentaje).
- Horas extras (horas totales y como porcentaje de las horas normales).
- Cantidad de horas totales y en porcentaje dedicadas a diferentes categorías de trabajos (tareas proactivas, acciones a falta de y modificaciones, y subconjuntos de estas categorías).
- Lista de espera (por número de órdenes de trabajo y por horas estimadas de tareas pendientes).

- Relación de gastos en contratistas de mantenimiento a gastos de mano de obra propia de mantenimiento.

2.2.2.3. **Repuestos y materiales**

Repuestos y materiales normalmente incluye la porción de gastos de mantenimiento que no va bajo el encabezado de “mano de obra”. Cuan bien son gestionados se mide y analiza usualmente de las siguientes maneras:

- Gastos totales en repuestos y materiales (totales y por unidad de producción)
- Valor total de repuestos en almacén
- Rotación de inventarios (valor total de repuestos y materiales en almacén dividido por el gasto anual en estos ítems)
- Nivel de servicio (porcentaje de los ítems en inventario que están en almacén cuando llega una solicitud)
- Valores absolutos y relativos de diferentes tipos de inventario (consumibles, repuestos activos, repuestos de “seguridad”, inventario muerto).

2.2.2.4. **Planificación y control**

Cuan bien se planifican y controlan las actividades de mantenimiento afecta todos los otros aspectos de la efectividad y eficiencia del mantenimiento, desde la utilización global de mano de obra de mantenimiento hasta la duración de las paradas individuales. Medidas típicas incluye:

- Horas totales de tareas de mantenimiento predictivo/preventivo/búsqueda de fallas programadas por período
- Las horas anteriores como porcentaje de las horas totales
- Porcentaje de las tareas anteriores completadas según lo planeado
- Horas trabajadas según plan versus horas trabajadas no planeadas
- Porcentaje de trabajos para los que fueron estimadas duraciones
- Precisión de las estimaciones (horas estimadas versus horas reales para los trabajos que fueron estimados).

Algunas de estas medidas de eficiencia son útiles para tomar decisiones inmediatas o iniciar acciones de gestión a corto plazo (gastos contra presupuestos, productividad del tiempo, índices de cumplimiento de programa, lista de espera). Otras son muy útiles para analizar tendencias y comparar desempeños con plantas similares de modo de planificar acciones correctivas a largo plazo. Juntas, son de gran ayuda para focalizar la atención en qué debe ser hecho para asegurar que los recursos de mantenimiento sean usados lo más eficientemente posible.

Hay con frecuencia una tendencia a prestar mucha más atención a la eficiencia y no suficiente a la efectividad del mantenimiento. Esto es muy desafortunado, porque los aspectos que tienen que ver con la efectividad del mantenimiento usualmente tienen un impacto mucho mayor en el estado global físico y financiero de la organización que los que tienen que ver con la eficiencia del mantenimiento.

2.2.3. OEE - EFECTIVIDAD GLOBAL DE EQUIPOS

OEE (Overall Equipment Effectiveness) ó “Efectividad Global de Equipos” es un indicador desarrollado bajo la filosofía del TPM alrededor de los años 80. Fue una herramienta establecida en la industria para medir y supervisar el rendimiento de producción; su aplicación se extendió a máquinas, celdas de fabricación o procesos completos de fábricas. Esta herramienta incorpora tres indicadores básicos:

- **DISPONIBILIDAD** o tiempo productivo (tiempo improductivo previsto e imprevisto).
- **EFICIENCIA** de ejecución (real frente a la capacidad prevista en el diseño).
- **RENDIMIENTO** o Índice de calidad del producto de salida (porcentaje de productos de calidad).

El cálculo de estos indicadores puede ser realizado de las siguientes maneras:

$$DISPONIBILIDAD = \frac{\text{Tiempo de operación} - (\text{Tiempos perdidos} + \text{Tiempos bajos})}{\text{Tiempo de operación}} \quad [2.5]$$

Donde:

Tiempo de operación: tiempo empleado en la fabricación (MTBF)

Tiempos perdidos: tiempos perdidos por fallas en el equipo (MTTR)

Tiempos bajos: tiempos de ajustes y puesta en marcha, más tiempos autorizados

$$EFICIENCIA = \frac{Velocidad\ de\ operación}{Velocidad\ de\ diseño} \quad [2.6]$$

Donde:

Velocidad de operación: velocidad real del equipo, línea o proceso

Velocidad de diseño: velocidad máxima del equipo

$$RENDIMIENTO = \frac{Producción\ aprobada}{Producción\ total} \quad [2.7]$$

Donde:

Producción aprobada: total de producción aprobada, no incluye defectos en el proceso, rechazo, defectos de calidad a reproceso, etc.

Producción total: producción total programada

Por tanto, el OEE tiene la siguiente expresión:

$$OEE = DISPONIBILIDAD * EFICIENCIA * RENDIMIENTO \quad [2.8]$$

La utilización de este indicador durante un proceso RCM deberá ser cuidadosamente analizada, tomando en cuenta las recomendaciones realizadas anteriormente en el numeral 2.2.1.4.

2.2.4. BENEFICIOS DEL RCM

El uso de RCM ayuda a satisfacer todas las expectativas de la tercera generación. El alcance con que realiza esto está resumido en los siguientes aspectos:

2.2.4.1. Mayor seguridad e Integridad Ambiental

RCM contribuye a la mayor seguridad y protección ambiental de las siguientes formas:

- *La sistemática revisión de las implicaciones de seguridad y ambientales de cada falla evidente antes de considerar los aspectos operacionales* significa que la seguridad y la integridad ambiental se convierten – y son vistas en consecuencia – en prioridades principales del mantenimiento.
- Desde el punto de vista técnico, *el proceso de decisión dicta que las fallas que pueden afectar la seguridad o el medio ambiente **deben** ser manejadas* de algún modo, simplemente no se tolera la inacción. Como resultado, las tareas son seleccionadas y pensadas para reducir todos los riesgos de seguridad y ambientales del equipo a un nivel aceptable, o eliminarlos completamente.
- El enfoque estructurado de los sistemas de protección, especialmente el concepto de función oculta y el ordenado enfoque de la búsqueda de fallas, lleva a substanciales mejoras en el mantenimiento de dispositivos de protección. Esto *reduce significativamente la probabilidad de fallas múltiples* que tienen serias consecuencias.
- Involucrando grupos de operadores y mantenedores directamente en el análisis los hace más sensibles a los riesgos reales asociados con sus activos. Esto los hace *menos propensos a cometer errores peligrosos, y más proclives a tomar las decisiones correctas cuando las cosas realmente van mal*.
- *La reducción global en el número y frecuencia de tareas cíclicas* (especialmente tareas invasivas que perturban sistemas básicamente estables) reduce el riesgo de fallas críticas que ocurren tanto cuando el mantenimiento se está realizando como inmediatamente después de la puesta en marcha.

2.2.4.2. Mayor disponibilidad y Confiabilidad de Planta

El alcance de la mejora de desempeño claramente depende del nivel de desempeño inicial. Por ejemplo, un proceso que está alcanzando el 95% de disponibilidad, tiene menos potencial de mejora que otro que está actualmente alcanzando solo 85%. Sin embargo, si se aplica correctamente, el RCM alcanza mejoras significativas sin importar el punto de partida.

El desempeño de la planta se mejora reduciendo el número y la severidad de las fallas no anticipadas que tengan consecuencias operacionales. El RCM ayuda a conseguir esto de la siguiente forma:

- *La revisión sistemática de las consecuencias operacionales de cada falla* que no haya sido tratada ya como riesgo de seguridad, junto con el criterio estricto usado para evaluar la efectividad de las tareas, aseguran que solo las tareas más efectivas son seleccionadas para manejar cada modo de falla.
- El énfasis puesto en las tareas a condición ayuda a asegurar que *las fallas potenciales sean detectadas antes que se conviertan en fallas funcionales*. Esto ayuda a reducir las consecuencias operacionales de tres formas:
 - ✓ Los problemas pueden ser corregidos en un momento en que la parada de la máquina no tenga efecto para las operaciones.
 - ✓ Es posible asegurar que todos los recursos necesarios para reparar la falla estarán disponibles con anterioridad, lo que acorta la parada.
 - ✓ La corrección sólo se lleva a cabo cuando el activo realmente lo necesita, lo cual extiende el intervalo entre intervenciones correctivas. Esto significa que el activo deberá ser sacado de servicio menos seguido.
- Relacionando cada modo de falla a la falla funcional correspondiente, la hoja de información provee una herramienta para *diagnósticos de falla rápidos*, que nos lleva a *tiempos de reparación más cortos*.
- El mayor énfasis en el mantenimiento a condición *reduce la frecuencia de las grandes paradas*, con el correspondiente incremento a largo plazo de la disponibilidad.
- A pesar de todo, puede ser necesario planificar una parada por una de las siguientes razones:
 - ✓ Para prevenir una falla que es genuinamente dependiente de la edad.
 - ✓ Para corregir una falla potencial.
 - ✓ Para corregir una falla oculta.

- ✓ Para realizar una modificación.

En estos casos, la disciplina de revisión de la necesidad de acciones preventivas y correctivas que es parte del proceso RCM lleva a listas de trabajos con detención más cortas, lo cual nos lleva a *paradas más cortas*, las cuales son más fáciles de gestionar y por lo tanto más probables de completar según lo planeado.

- Listas de trabajos de parada más cortas también nos llevan a *menor cantidad de problemas de mortalidad infantil* cuando la planta sea puesta en marcha de nuevo después de la parada, porque no ha sido perturbada demasiado. Esto nos conduce a un aumento global de la confiabilidad.
- El RCM brinda una oportunidad para los participantes en el proceso de *aprender rápida y sistemáticamente como operar y mantener plantas nuevas*. Esto les permite evitar muchos de los errores que de otro modo hubieran cometido como resultado del proceso de aprendizaje, y les asegura que la planta sea mantenida correctamente desde el comienzo.
- Mediante la utilización del grupo de personas que mejor conocen el equipo para desarrollar un análisis sistemático de los modos de falla, resulta posible *identificar y eliminar las fallas crónicas* que de otro modo no serían detectadas, y tomar una acción adecuada.

2.2.4.3. **Mejor calidad del Producto**

Concentrándose directamente en los aspectos de calidad del producto, como se pudo observar cuando se trató la definición de los límites superiores e inferiores al definir las fallas funcionales, el RCM hace mucho para mejorar los rendimientos de procesos automatizados.

2.2.4.4. **Mayor eficiencia del Mantenimiento (Costo-efectividad)**

El RCM ayuda a reducir, o al menos a controlar el ritmo de crecimiento de los costos de mantenimiento de la siguiente forma:

2.2.4.4.1. Menos mantenimiento de rutina

Cualquier activo que tuviera un sistema de mantenimiento preventivo completamente desarrollado y que se le haya aplicado RCM correctamente, sufre una reducción de entre el 40% y el 70% en la carga de trabajo programada de mantenimiento de rutina. Esta reducción es parcialmente debida a la reducción del número de tareas, pero principalmente debida a un incremento global en los intervalos entre tareas. También sugiere que si se usa RCM para desarrollar programas de mantenimiento para equipos nuevos ó para equipos que actualmente no están sujetos a un programa formal de mantenimiento preventivo, la carga de trabajo de rutina podría ser 40% a 70% menor que si el programa de mantenimiento hubiera sido desarrollado por cualquier otro medio.

2.2.4.4.2. Mejor contratación de servicios de mantenimiento

Aplicar RCM a los contratos de mantenimiento lleva a ahorros en dos áreas. Primero, una clara comprensión de las consecuencias de la falla permite a los compradores especificar tiempos de respuesta más precisos; dado que las respuestas rápidas son con frecuencia el más costoso aspecto de los contratos de mantenimiento, un juicioso ajuste fino en esta área puede llevarnos a ahorros sustanciales. Segundo, el análisis detallado de las tareas preventivas permite a los compradores reducir tanto el contenido como la frecuencia de la porción rutinaria de los contratos de mantenimiento, usualmente por la misma cantidad (40% a 70%) que cualquier otro programa que haya sido preparado sobre una base tradicional; esto lleva a los correspondientes ahorros en los costos de contratación.

2.2.4.4.3. Menor necesidad de usar expertos caros

Si participan de las reuniones RCM técnicos de campo empleados del proveedor de los equipos, el intercambio de conocimiento que tendrá lugar lleva a un salto cuántico en la habilidad de los mantenedores empleados por el usuario para resolver problemas difíciles por sí mismos. Esto lleva a una caída dramática en la necesidad de solicitar ayuda (cara) de allí en adelante.

2.2.4.4.4. *Especificaciones más claras para la adquisición de nueva tecnología de mantenimiento*

El criterio usado para decidir si una tarea proactiva es técnicamente factible y merece la pena, aplica directamente a la adquisición de equipos de monitoreo de la condición. Si este criterio fuera aplicado desapasionadamente a esas adquisiciones, un número de errores caros podrían ser evitados.

Muchos de los ítems listados anteriormente bajo “mejor desempeño operacional” también mejoran el costo-efectividad del mantenimiento.

2.2.4.5. **Vida útil más larga de ítems caros**

Asegurando que cada activo reciba el mínimo básico de mantenimiento esencial, es decir, la cantidad de mantenimiento necesaria para asegurar que lo que puede hacer se mantenga por encima de lo que los usuarios quieren que haga, el proceso RCM ayuda mucho para asegurar que casi cualquier activo puede hacerse durar tanto como su estructura básica de soporte se mantenga intacta y haya repuestos disponibles.

Como se mencionó en varias ocasiones, el RCM también ayuda a los usuarios a aprovechar la máxima vida útil de cada componente individual al seleccionar mantenimiento a condición con preferencia a cualquier otra técnica cuando sea posible.

2.2.4.6. **Mayor motivación de los individuos**

El RCM ayuda a mejorar la motivación de las personas que están involucradas en el proceso de revisión, de muchas maneras. Primero, una más clara comprensión de las funciones del activo y de lo que deben hacer para mantenerlo trabajando, aumenta en gran forma sus competencias y por tanto su confianza.

Segundo, una clara comprensión de los aspectos que están más allá del control de cada individuo, les permite trabajar más cómodos dentro de los límites.

Tercero, el saber que cada miembro del grupo jugó un rol en la formulación de objetivos, en la toma de decisión de qué debe ser hecho para alcanzarlos y en la toma de decisión de quién debe hacerlo lleva a un fuerte sentido de propiedad.

Esta combinación de competencias, confianza, comodidad y propiedad implica que la gente involucrada será mucho más propensa a querer hacer el trabajo correcto en forma correcta desde la primera vez.

2.2.4.7. **Mejor trabajo en Equipo**

El enfoque altamente estructurado del RCM hacia el análisis y toma de decisión en los problemas de mantenimiento no sólo alimenta el trabajo en equipo dentro de los propios grupos de revisión, sino que también mejora la comunicación y la cooperación entre:

- Producción o el departamento de operaciones y la función mantenimiento.
- Gerentes, supervisores, técnicos y operarios.
- Diseñadores de equipos, proveedores, usuarios y mantenedores.

2.2.4.8. **Una base de datos de Mantenimiento**

Las hojas de Información y de Decisión de RCM proveen un número adicional de beneficios, como ser:

Adaptación para circunstancias cambiantes: La base de datos de RCM hace posible dar trazabilidad a las razones para cada tarea de mantenimiento hasta llegar a las funciones y al contexto operativo del activo. Como resultado, si cualquier aspecto del contexto operativo cambia, es fácil identificar las tareas que son afectadas y revisarlas. A la inversa, son igualmente fáciles de identificar las tareas que no son afectadas por esos cambios, lo que significa que no se perderá tiempo en revisar dichas tareas.

Un registro de auditoría: las hojas de trabajo de RCM suministran evidencia documentada que los programas de mantenimiento son construidos sobre bases racionales y defendibles; en una forma clara, lógica y fácilmente comprensible. Lo cual es hoy una exigencia de la legislación para muchos usuarios de activos físicos.

Dibujos y manuales más precisos: el proceso RCM usualmente significa que los manuales y dibujos son leídos en una forma completamente nueva. La gente comienza a preguntar “¿qué hace?” en lugar de “¿qué es?”. Esto lleva a

detectar una sorprendente cantidad de errores que podrían haber pasado desapercibidos en los dibujos tal cual construcción. Esto ocurre más frecuentemente si los operadores y mantenedores que trabajan con el activo son incluidos en los grupos de revisión.

Reduce los efectos de la rotación de personal: todas las organizaciones pierden cuando gente con experiencia se va o se retira y se lleva su conocimiento y experiencia consigo. Registrando esta información en la base de datos de RCM, la organización se hace mucho menos vulnerable a estos cambios.

La introducción de sistemas expertos: la información en la “Hoja de Información” provee en particular una excelente base para un sistema experto. De hecho, muchos usuarios miran esta hoja de trabajo como un simple sistema experto en sí mismo, especialmente si la información es guardada y ordenada adecuadamente en una base de datos computarizada.

2.2.4.9. **Un marco de referencia integrador**

Todos los aspectos discutidos antes son parte de la corriente principal de la gestión del mantenimiento, y muchos son realmente el objetivo de programas de mejora. Un elemento clave del RCM es que provee un efectivo marco de referencia paso a paso para atacarlos a todos ellos de una vez, y para involucrar a todos los que tengan algo que ver con los equipos en el proceso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Siguiendo los preceptos del modelo desarrollado en el capítulo anterior, durante el presente se evidencian los resultados de la implementación del modelo del “*Sistema de Gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*” en la empresa Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A.

3.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA

3.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN “SUCESORES DE JACOBO PAREDES M. S. A.

Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A. es una empresa familiar, del sector de manufactura de alimentos. Fue fundada inicialmente como una filial de Pastificio Ambato por Jacobo Paredes en noviembre de 1968, respondiendo a la creciente demanda que existía en ese entonces en la matriz de la ciudad de Ambato (Pastificio Ambato). En junio de 1970 se constituye como Sucesores de Jacobo Paredes M. Cía. Ltda., posteriormente en el año 2000 pasa a ser sociedad anónima.

La organización cuenta actualmente con un complejo industrial compuesto de 3 naves (plantas) y un edificio donde funciona el área administrativa, ubicado en el sector sur de la ciudad de Quito, en la avenida Maldonado 10049 y calle Cusubamba, ocupando un área aproximada de 12,500 metros cuadrados.

Su negocio se basa en la fabricación de pastas (fideos) y harinas alimenticias, con una participación en el mercado nacional de pasta alimenticia, en la actualidad, de aproximadamente un 17%. Además posee un nicho en el mercado internacional con exportaciones a Colombia, Estados Unidos y España, adicionalmente al momento está iniciando negocios con Costa Rica. Dichas exportaciones las mantiene formalmente desde hace aproximadamente 10 años.

Si bien en los últimos años la organización prácticamente no ha experimentado incrementos en sus ventas anuales, tampoco ha sufrido disminución alguna en las mismas. Sin embargo las ventas del año 2008 con respecto a las del 2007, reflejan un crecimiento del 16% en toneladas vendidas.

3.1.1.1. Estructura Organizacional

La organización es una empresa que pertenece al sector de la mediana industria, cuenta con alrededor de 200 empleados entre personal de producción y personal administrativo.

Su estructura es de tipo integral, puesto que su proceso inicia con la importación de su materia prima, el trigo, y finaliza con la comercialización de su producto principal, la pasta alimenticia, además de la harina, sémola, semolina y demás subproductos asociados al procesamiento del trigo.

La comercialización de dichos productos las realiza una parte en forma directa y, otra a través de la empresa comercializadora REPARTI (Repartos Alimenticios Cía. Ltda.), la cual es parte del grupo familiar y funciona en el mismo complejo industrial de Sucesores. Reparti, además de los productos de la organización, comercializa una serie de otros productos de importantes marcas del mercado ecuatoriano.

Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A. como tal, se encarga de la producción de las pastas alimenticias y harinas en sus tres naves industriales (Planta Molinos, Pastificio y Bodega de producto Terminado), de la comercialización de pastas alimenticias a los grandes supermercados (Supermaxi, Santa María, entre otros) y, de la exportación de las pastas alimenticias a los mercados externos antes mencionados (Colombia, Estados Unidos, España y Costa Rica). Mientras que Reparti se encarga de la comercialización de las pastas, harina, sémola, semolina y demás subproductos, a los restantes clientes mayoristas y minoristas a nivel nacional.

La organización mantiene una administración de tipo vertical sin mayor complejidad en sus niveles jerárquicos, como se puede observar en su Organigrama Funcional mostrado en la Figura 3.1.

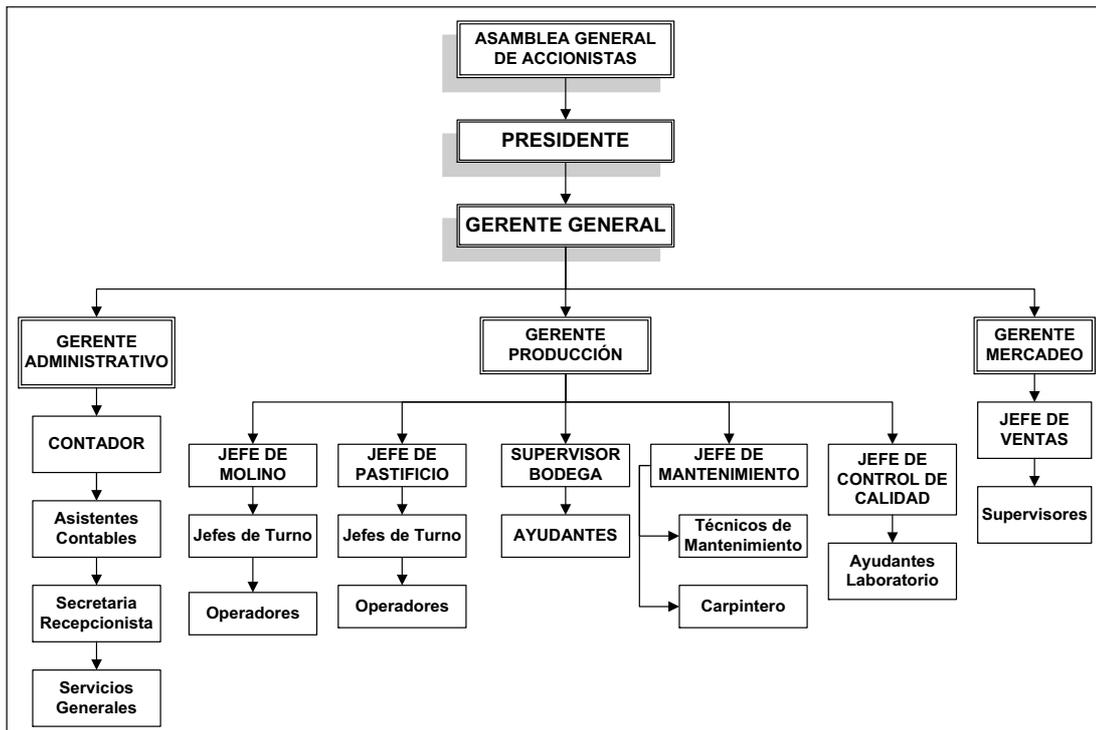


Figura 3.1. Organigrama Funcional de Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A.

3.1.1.2. Productos de la Organización

Desde su creación hasta el año 2007 la organización fabricó pastas alimenticias con la marca “PACA”. Actualmente fabrica y comercializa las marcas TOSCANA, BOLONIA, SNOODLE y CORDILLERA, además de marcas privadas como Supermaxi, Aki, Nuria, La Cholita, entre otras.

Actualmente el mercado ecuatoriano de pastas alimenticias o fideos es de 55,000 toneladas anuales, considerando que la organización tiene aproximadamente el 17% del mismo, Sucesores tiene una producción de aproximadamente 9350 toneladas anuales de fideo sólo para el mercado nacional, esto es, una producción mensual de 780 toneladas. La participación en el mercado internacional es incipiente, pero representa para la organización un 8% de sus ventas aproximadamente. En lo que va del presente año 2009, la organización procesa aproximadamente 270 toneladas semanales de trigo, esto es, 1080 toneladas mensuales.

En las marcas TOSCANA y BOLONIA, tanto en fideo laminado (blanco) como en fideo prensado (amarillo), fabrica las siguientes clases: macarrón N° 1, broca, pluma, fusilo, codoliso, cabello precortado, supercabello, avemaría, selvitas, ABC/123, spaghetti, spaghetti a la boloñesa, fettuccine tricolor, macarroni & cheese, fusilli tricolor, capellini tricolor, pluma tricolor, zuppa di campo tricolor, lazo N° 1, corbata, canasto, margarita, canasto Ilusión, capeletti ilusión, caracol ilusión, margarita ilusión, fantasía, glutenado.

En la marca SNOODLE fabrica el fideo instantáneo (precocido al vapor y frito en aceite de palma).

En la marca CORDILLERA fabrica los siguientes productos: sémola, harina, semolina, semita, afrechillo.

Además, comercializa los siguientes subproductos, sin marca: tamo, granza A, granza B, remolido.

3.1.2. PROCESOS DE LA ORGANIZACIÓN

El accionar de Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A. está gobernado por la interacción de los siguientes procesos:

3.1.2.1. Procesos Estratégicos:

1. Planificación Financiera
2. Captación y Retención de Mercados

3.1.2.2. Procesos Productivos:

1. Investigación y Desarrollo de Nuevos Productos
2. Publicidad y Mercadeo
3. Aseguramiento de Calidad
4. Comercialización
5. Fabricación
6. Servicio Post-Venta al Cliente

3.1.2.3. **Procesos de Apoyo**

1. Recursos Humanos
2. Compras y Adquisiciones
3. Procesos Administrativos
4. Procesos Tecnológicos

3.1.2.4. **Proceso de Fabricación**

Para la elaboración de sus productos, la organización cuenta con dos plantas, Planta Molinos y Planta de Pastificio, integradas al proceso de producción en forma automatizada. El producto obtenido en la Planta Molinos, la semolina, después de ser almacenada en los silos de harina de dicha planta, es transportada mediante un proceso neumático a los silos de almacenamiento de la Planta de Pastificio, desde donde mediante procesos similares, es transportada a las diferentes líneas de producción para la fabricación de la pasta.

3.1.2.4.1. *Proceso de fabricación de Semolina*

La fabricación de la semolina es el primer proceso productivo dentro de la organización, el cual se lo lleva a cabo en La **Planta Molinos**. Dicha planta cuenta con los siguientes tres subprocesos claramente definidos, los cuales funcionan en forma autónoma:

1. Recepción
2. Acondicionamiento
3. Molienda

Más adelante se hará una descripción más detallada de cada uno de estos tres subprocesos que intervienen en la fabricación de la semolina.

3.1.2.4.2. *Proceso de fabricación de Pasta*

La fabricación de la pasta alimenticia (fideo) es realizada en La **Planta de Pastificio**, la cual cuenta con varias líneas de producción, todas de funcionamiento continuo y automatizado, a saber: Línea Bühler 1000, Línea

Bühler 600, Línea Pasta Larga, Línea Glutenados, Línea Precocidos y, Empaquetado.

Además, cuenta con una tercera planta que constituye la **bodega de producto terminado**, desde donde se realizan los despachos a los diferentes clientes.

3.1.2.5. **Proceso de Mantenimiento**

El proceso de mantenimiento, como en una gran parte de las organizaciones de nuestro país, no está claramente definido, ni en su estructura organizativa ni en su interacción con los demás procesos de la organización. Como se puede observar en el Organigrama Funcional de la Figura 3.1 responde jerárquicamente a la Gerencia de Producción y, básicamente es el proceso que se encarga de brindar el apoyo técnico a todas las actividades de la organización.

El departamento de mantenimiento de la organización cuenta al presente con el siguiente personal:

- 1 Jefe de mantenimiento, cargo cubierto actualmente por un ingeniero electrónico
- 1 Técnico electricista, de formación electromecánico
- 1 Técnico mecánico, con especialidad en torno
- 1 Técnico mecánico, con especialidad en soldas
- 2 Técnicos de servicios generales, uno de formación carpintero y uno de formación en albañilería.

Las diferentes actividades que desarrolla el citado departamento, puede observarse detalladamente en los diagramas de flujo de las Figuras 3.2 y 3.3.

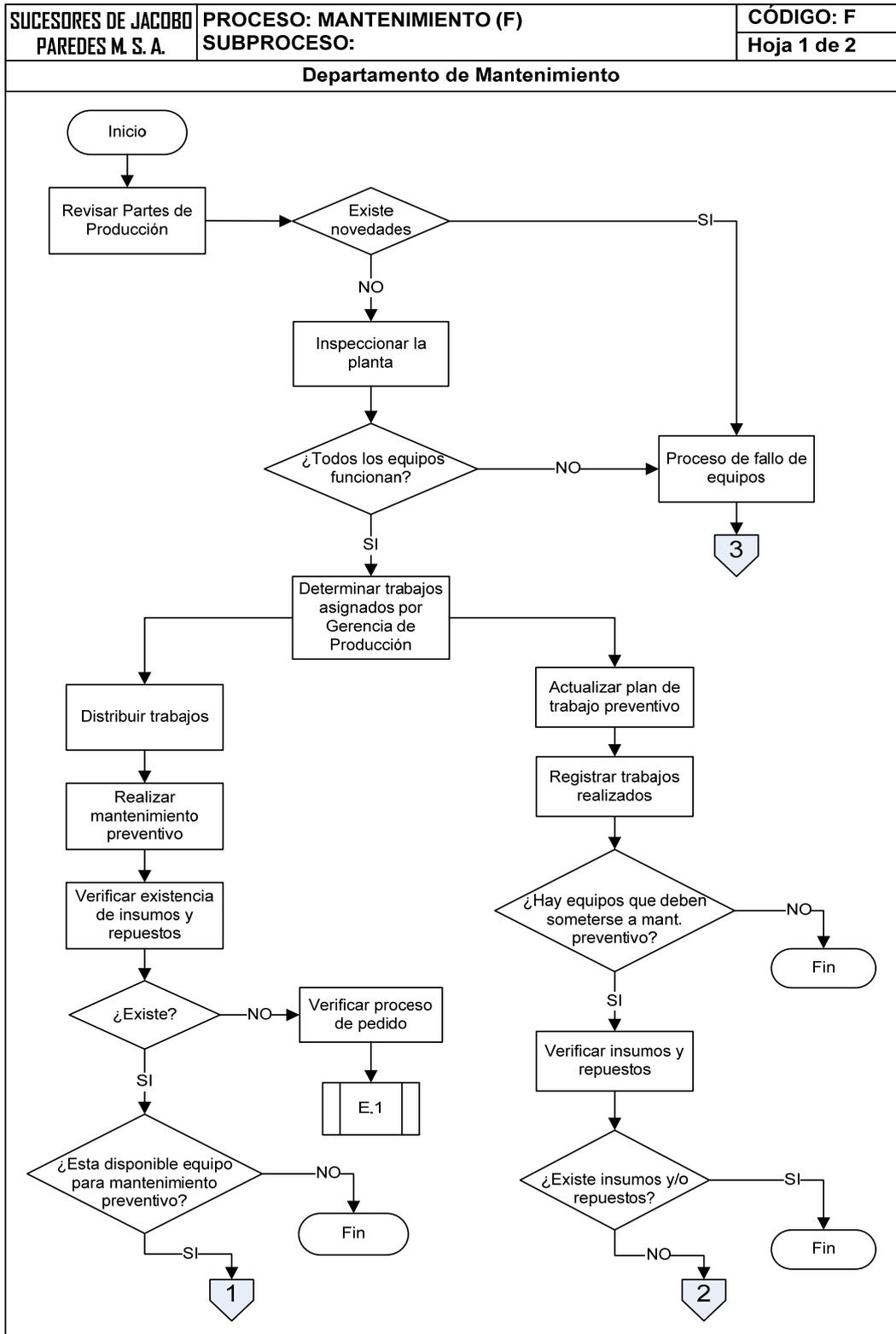


Figura 3.2. Diagrama del proceso de mantenimiento de Sucosores

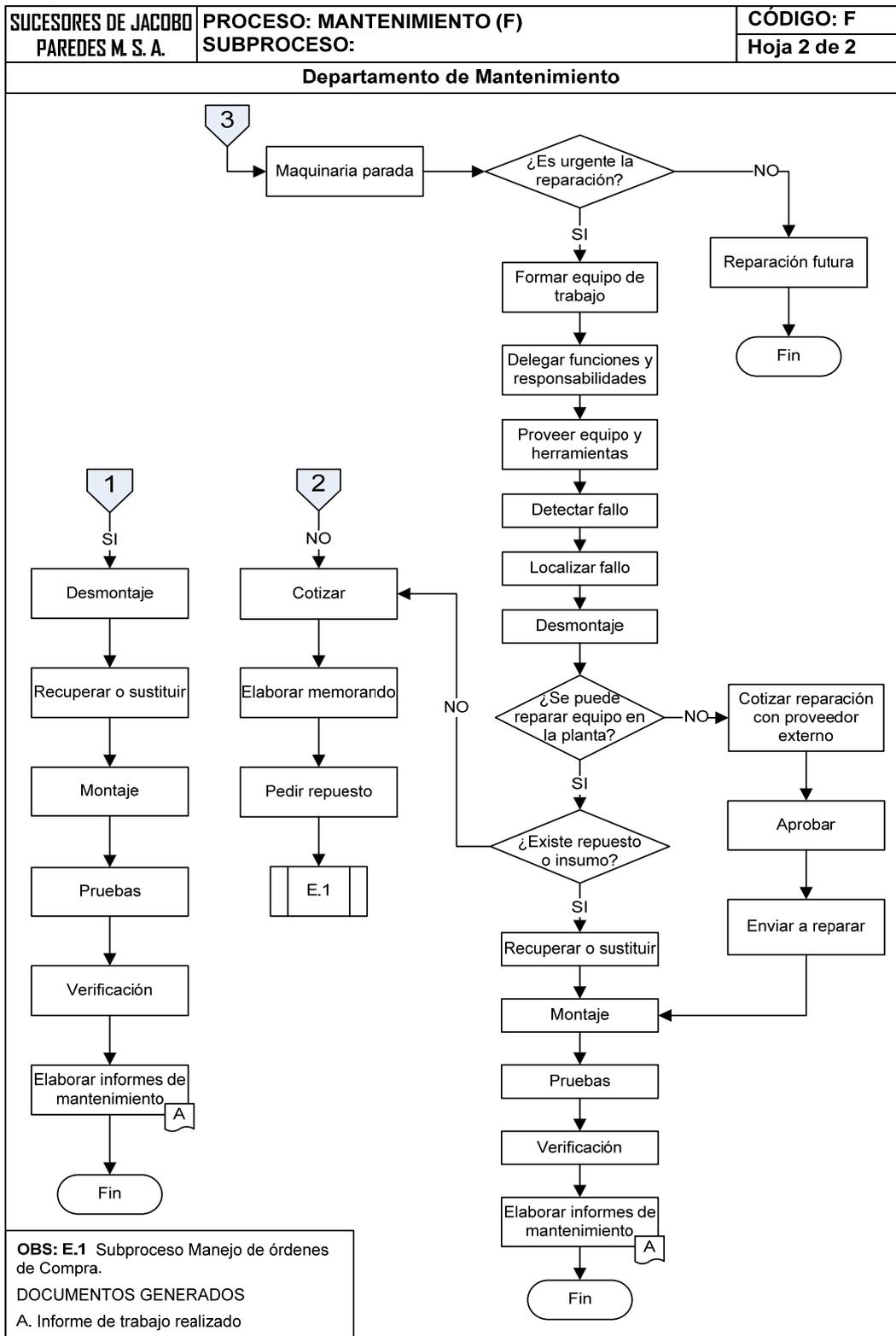


Figura 3.3. Diagrama del proceso de mantenimiento de Sucesores. Continuación...

Como se puede advertir, sus actividades se basan principalmente en una política reactiva, por lo que tienen un alto contenido de las mismas orientadas al denominado mantenimiento correctivo.

Además, mantiene planes de mantenimiento preventivo de los principales equipos y líneas de producción, especialmente de la planta de fabricación de pasta (Pastificio).

Debido principalmente a lo reducido de su equipo humano, las actividades del departamento de mantenimiento se centran mayoritariamente en la planta de Pastificio, dejando de lado casi por completo a la planta Molinos.

3.1.2.6. **Proceso de mantenimiento de la Planta Molinos**

Debido a las razones antes citadas, las actividades de mantenimiento de la planta Molinos, se han venido realizando y siguen siendo ejecutadas mayoritariamente por el personal de producción de dicha planta. El mencionado personal, con su jefe de planta a la cabeza, ha desarrollado habilidades que les permite realizar los trabajos de reparación y mantenimiento de los equipos de la planta, en forma bastante eficiente.

El proceso actual de las actividades de mantenimiento en la planta Molinos se puede apreciar en las Figuras 3.4 y 3.5.

Como se puede observar en el diagrama de flujo del proceso de mantenimiento de la planta Molinos, supuestamente la decisión de quién realizará el trabajo de mantenimiento es del Jefe de producción, pero debido a que el personal de mantenimiento está casi siempre ocupado realizando labores en la planta Pastificio, los trabajos la mayoría de veces son encargados al propio personal de producción de la planta Molinos.

Además, el funcionamiento intrínseco de la planta permite que las actividades de mantenimiento sean realizadas por su personal de producción, debido principalmente a que la planta produce cuatro días a la semana.

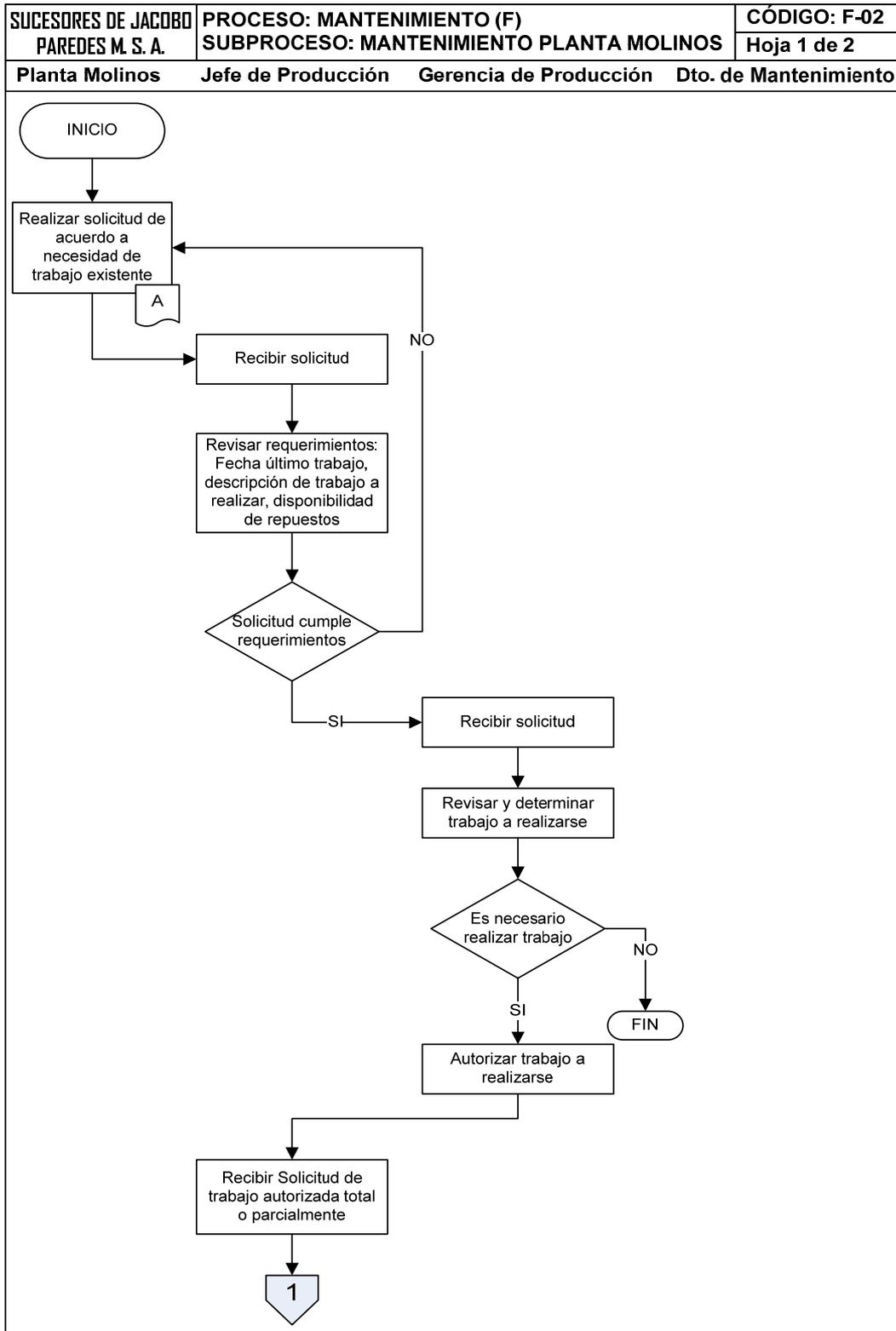


Figura 3.4. Diagrama del subproceso de mantenimiento de la Planta Molinos

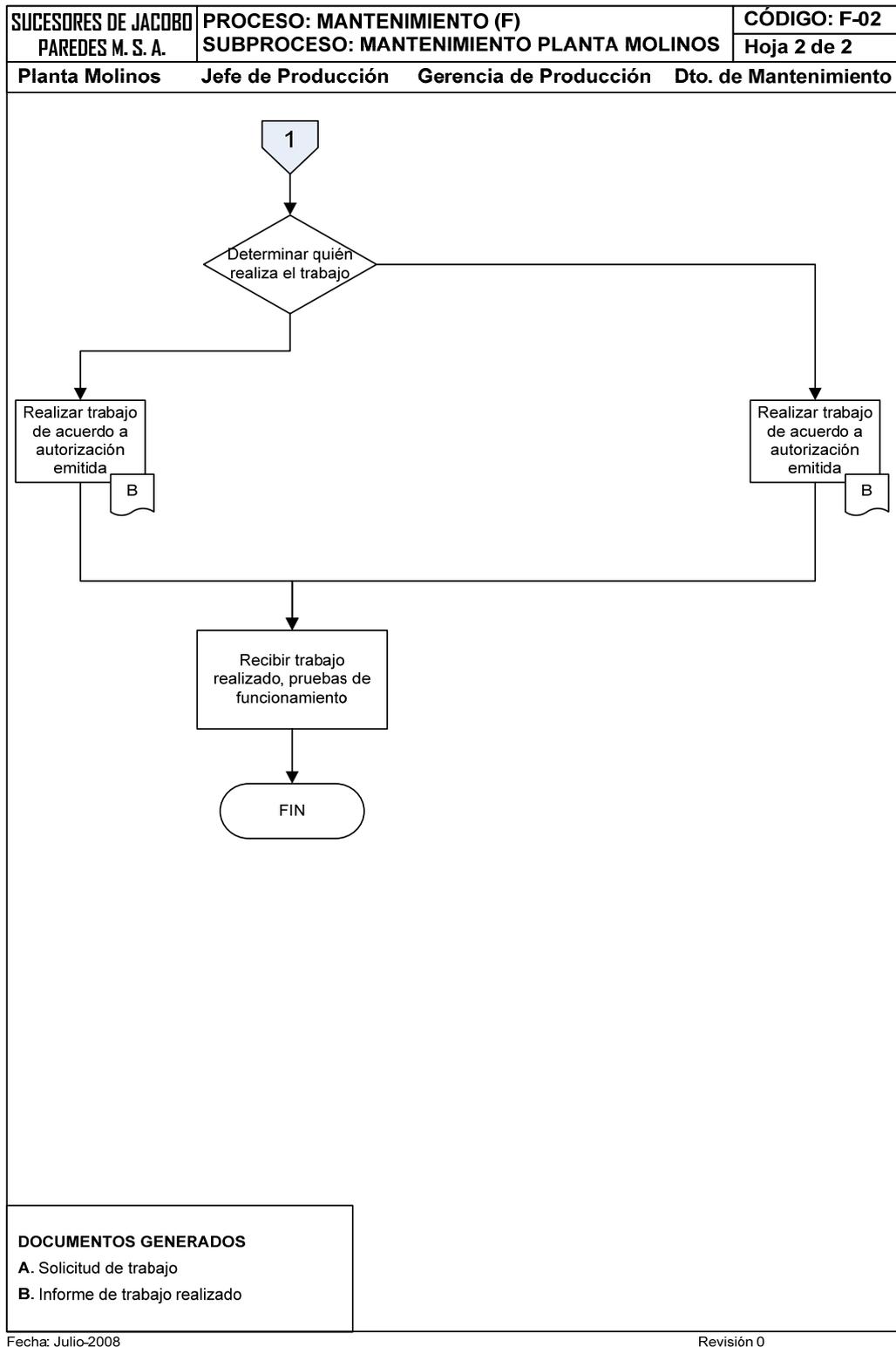


Figura 3.5. Diagrama del subproceso de mantenimiento de la Planta Molinos.
Continuación...

De esta forma, el personal de producción de dicha planta, realiza actividades de mantenimiento que tienen que ver con limpieza, recuperación o sustitución de componentes, cambios de aceite y, reparaciones cuando existen paros no programados de alguno de los procesos en ejecución; situación esta última en la que casi siempre interviene también el personal de mantenimiento, para restablecer lo más pronto posible el funcionamiento normal del proceso de producción. Adicionalmente, el personal del departamento de mantenimiento es llamado a intervenir cuando existen trabajos de calibración o reparación de equipos, que no pueden ser realizados por el personal de producción.

3.2. DESARROLLO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD

De las dos plantas de producción que tiene la organización Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A., la PLANTA MOLINOS se ha seleccionado para el desarrollo del presente proyecto, debido a varias razones, algunas citadas anteriormente, y que pueden resumirse como sigue:

- Es la planta que la Gerencia General de la organización designó como proyecto piloto para futuras implementaciones de la metodología RCM.
- Es la planta donde se inicia el proceso de producción de la organización, con la fabricación de la semolina, que constituye la materia prima para la planta de Pastificio.
- La planta Molinos, en el presente, recibe muy poca atención por parte del limitado personal que conforman el departamento de mantenimiento.
- La planta Molinos no cuenta con un plan de mantenimiento eficientemente organizado, que permita al personal de producción de la planta y al personal de mantenimiento, llevar adelante actividades que aseguren el óptimo funcionamiento de los equipos.

La aplicación del modelo del Sistema de Gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en la Planta Molinos, se basará en el análisis y desarrollo de los siguientes aspectos, cuyos fundamentos fueron discutidos detalladamente en el capítulo anterior:

1. Capacitación del personal que intervendrá en el desarrollo del proceso. A diferencia de cualquier otra metodología de mantenimiento, RCM basa su aplicación en la actuación de grupos multidisciplinarios conformados principalmente por gente de mantenimiento y operaciones, por lo que este personal necesita ser capacitado en los fundamentos del modelo, antes de que éste inicie su implementación.
2. Selección de la estrategia de implementación
3. Decidir que activos serán sometidos al proceso RCM
4. Análisis del contexto operacional de la planta seleccionada
5. Conformación de los grupos de revisión RCM.

Los recursos que la organización comprometerá para la aplicación del modelo son los siguientes:

1. Horas hombre del personal involucrado en el desarrollo del proceso, inicialmente para su capacitación y luego para su participación en los grupos de revisión de RCM.
2. Recursos económicos necesarios para la adquisición de herramientas y/o equipos necesarios para el monitoreo de condición.
3. Por tratarse de un proyecto de investigación, tanto la capacitación del personal como las horas hombre del facilitador, no tendrán ningún costo para la organización, pero normalmente también deberán ser considerados entre los costos de un proyecto de RCM.

3.2.1. CAPACITACIÓN DEL PERSONAL INVOLUCRADO EN EL PROCESO

Como se discutió ampliamente en el numeral 2.1.10, uno de los pilares fundamentales para desarrollar un modelo de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad es la participación de un sinnúmero de personas, gente que tiene un profundo y amplio conocimiento de los activos a ser sometidos al análisis de RCM, así como del contexto operativo en el cual dichos activos funcionan.

La gran cantidad de información que se necesita para el desarrollo del Sistema de Gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, como se

concluyó en el capítulo anterior, puede hacerse solamente sobre la base de una amplia consulta y cooperación, especialmente entre el personal de producción y mantenimiento, mediante su participación en pequeños grupos de trabajo, denominados “Grupos de revisión RCM”.

A pesar de que RCM provee una estructura común que permite a las personas de diferentes medios lograr consenso sobre una amplia gama de temas altamente técnicos, este proceso en sí mismo comprende muchos conceptos que son nuevos para la mayoría de personas. Estas personas necesitan aprender qué son y cómo se entrelazan estos conceptos nuevos antes de poder usar el proceso exitosamente. (Algunas personas especializadas en los enfoques tradicionales del mantenimiento también necesitan olvidar bastante).

Por tanto, la capacitación del personal involucrado en el proceso, a diferencia de otras metodologías, debe ser realizada antes del desarrollo del sistema. Es así como se llevó a cabo dos tipos de capacitación a los siguientes grupos de miembros de la organización Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A.:

1. Alta Gerencia
2. Personal de producción y mantenimiento

3.2.1.1. **Capacitación a la Alta Gerencia**

Se realizó un curso de introducción a los conceptos de RCM a la alta gerencia de la organización, específicamente a la Gerencia General y Gerencia de Producción, haciendo hincapié principalmente en las bondades del sistema de gestión de RCM y en la estructura de su implementación. Este curso fue desarrollado durante 2 reuniones de una hora 30 minutos cada una.

Mediante dicho curso se logró la sensibilización de la alta gerencia con el proceso de implementación, consiguiéndose el compromiso de los recursos para su aplicación, a la luz de los beneficios potenciales que el proceso ofrece en el área a implementarse.

Los recursos comprometidos por la alta gerencia, consistieron básicamente en la disponibilidad del personal tanto de producción de la Planta Molinos como del personal de Mantenimiento, inicialmente para su capacitación y

posteriormente para su participación en los grupos de revisión RCM. Además de la inversión en equipos para el monitoreo de condición, que se justifiquen plenamente luego de los análisis realizados por los grupos de revisión.

3.2.1.2. Capacitación al personal de producción y mantenimiento

El curso de capacitación en “Principios básicos de RCM” desarrollado para el personal de producción de la Planta Molinos y para el personal de mantenimiento, incluyendo sus jefaturas, se llevó a cabo durante 4 sesiones de 3 horas cada una.

Durante su realización se revisaron los conceptos en los que se fundamenta el modelo de Gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, así como los pasos a seguir para su análisis y desarrollo, el temario desarrollado fue el siguiente:

- **Día 1:**
 - Evolución del Mantenimiento
 - ✓ Expectativas crecientes de mantenimiento
 - ✓ Cambio en las técnicas de mantenimiento
 - Definición de RCM
 - Desarrollo del modelo de RCM
 - ✓ Definición de los activos físicos
 - ✓ Las siete preguntas básicas
 - Funciones y sus estándares de funcionamiento
 - ✓ Funciones
 - ✓ Estándares de funcionamiento
 - ✓ El contexto operacional
 - ✓ Tipos de funciones
 - Fallas funcionales
- **Día 2:**
 - Análisis de modos de falla y sus efectos AMFE
 - ✓ Modo de falla
 - ✓ Categorías de modos de falla
 - Capacidad decreciente

- Aumento del funcionamiento deseado
 - Capacidad inicial
- ✓ Detalle de los modos de falla
- ✓ Efectos de falla (Tiempo de parada de máquina)
- ✓ Fuentes de información de modos y efectos
- ✓ Niveles de análisis
- Consecuencias de falla
 - ✓ Técnicamente factible y merecer la pena
 - ✓ Funciones ocultas y funciones evidentes
 - ✓ Categorías de fallas evidentes
 - Consecuencias ambientales y para la seguridad (Riesgo)
 - Consecuencias operacionales
 - Consecuencias no operacionales
 - ✓ Consecuencias de fallas ocultas
 - Dispositivos de protección con seguridad inherente
 - Dispositivos de protección que no cuentan con seguridad inherente
 - ✓ Mantenimiento de rutina y funciones ocultas
 - ✓ La evaluación de las consecuencias de la falla
- **Día 3:**
 - Tareas de mantenimiento
 - Mantenimiento proactivo: tareas preventivas
 - ✓ Edad y deterioro
 - ✓ Fallas relacionadas con la edad
 - ✓ Tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclica
 - ✓ Frecuencia de tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclica
 - ✓ La factibilidad técnica de las tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclica
 - Fallas no asociadas con la edad
 - Mantenimiento proactivo: tareas predictivas
 - ✓ El intervalo P-F
 - ✓ El intervalo P-F neto

- ✓ Factibilidad técnica de tareas a condición
- ✓ Categorías de técnicas a condición
 - Monitoreo de condición
 - Variación de la calidad del producto
 - Monitoreo de los efectos primarios
 - Los sentidos humanos
- ✓ Selección de la categoría correcta
- ✓ Cómo determinar el intervalo P-F
- ✓ Cuándo vale la pena realizar tareas a condición
- Selección de tareas proactivas
- El proceso de selección de tareas
- **Día 4:**
 - Tareas de mantenimiento: Acciones “a falta de”
 - ✓ Tareas de búsqueda de falla
 - Aspectos técnicos de la búsqueda de falla
 - Intervalos de tareas de búsqueda de fallas
 - La factibilidad técnica de la búsqueda de fallas
 - ✓ Otras acciones “a falta de”
 - ✓ Ningún mantenimiento programado
 - ✓ Rediseño
 - Ante consecuencias ambientales o para la seguridad
 - Ante fallas ocultas
 - Ante consecuencias operacionales y no operacionales
 - Diagrama de decisión para una evaluación preliminar de una modificación propuesta
 - ✓ Recorridas de inspección
 - El diagrama de decisión de RCM
 - ✓ El proceso de decisión de RCM
 - Consecuencias de la falla
 - Tareas proactivas
 - Las preguntas “a falta de”
 - Tarea propuesta

- Intervalo inicial
- A realizarse por
- Casos de estudio y ejercicios prácticos

Al final del curso los participantes pudieron apreciar como la teoría trabaja con la práctica, durante un desarrollo de un modelo de gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

3.2.2. ESTRATEGIA DE IMPLEMENTACIÓN

Para la aplicación del modelo de gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A. se utilizará un “**Enfoque Selectivo**”, atendiendo a las siguientes razones:

- El desarrollo de la presente investigación se lo realizará sólo a una parte de la organización, esto es, a un grupo de activos de la Planta Molinos y se lo considerará como un proyecto piloto, que servirá de base para una futura implementación en la parte restante de la Planta Molinos y en la Planta de Pastificio.
- Aparentemente existen en la Planta Molinos equipos en los cuales la ocurrencia de cierto tipo de fallas podrían tener consecuencias para la seguridad y otros equipos cuyas fallas tienen consecuencias operacionales considerables, que necesitan ser atendidos prioritariamente durante el desarrollo de la presente investigación.

El enfoque selectivo como estrategia de implementación en la organización, permitirá aplicar el modelo de gestión de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad a los equipos “más importantes” de la Planta Molinos, permitiendo obtener un retorno rápido y mensurable, y a la vez, a un costo relativamente bajo.

Para llevar adelante el enfoque selectivo es necesario en primer lugar realizar una clasificación de los “activos importantes” en orden de importancia, para lo cual se llevará a cabo un análisis de criticidad a todos los equipos de la Planta Molinos.

3.2.2.1. Análisis de criticidad de los Equipos de la Planta Molinos

La metodología denominada “Análisis de criticidad” o “Evaluación de criticidad” permitirá jerarquizar los equipos de la Planta Molinos, en función de su impacto global dentro de la organización, a fin de determinar que activos inicialmente serán sometidos al proceso de RCM y el orden en el cual serán tratados.

Esta técnica se basa en el concepto conocido como “número riesgo/probabilidad” o NPR, cuyo modelo es:

$$\text{Riesgo o Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

Correspondiente a la ecuación 1.66 del numeral 1.5.2. Los NPR se obtendrán al asignar un valor numérico a la probabilidad de falla, y otro valor a la gravedad de las consecuencias de la falla. Los activos con los NPR (coeficientes) más altos se analizarán primero, luego aquellos con menores puntajes.

Mediante el presente modelo, además se asignará diferentes ponderaciones a distintas categorías de consecuencias de fallas, tomando en cuenta las particularidades de la organización.

3.2.2.1.1. Establecimiento de criterios

Considerando que la organización Sucesores de Jacobo Paredes M. S. A. es una industria manufacturera, se utilizará el siguiente modelo de factores ponderados para obtener los NPR o valor de Criticidad total de los equipos de la Planta Molinos:

$$\text{Criticidad Total} = \text{Frecuencia de fallas} * \text{Consecuencias}$$

$$\text{Consecuencia} = (\text{impacto operacional} * \text{flexibilidad operacional}) + \text{Costos de mantenimiento} + \text{impacto en Seguridad o Medio ambiente}$$

En la Tabla 3.1 se detalla los criterios que se emplearán para la determinación de los NPR de los activos (Amendola, 2006a; Orrego, 2008); dichos criterios son los siguientes:

Frecuencia de fallas: indica el número de veces que se repite un evento considerado como falla dentro de un período de un año, se tiene 4 posibles

calificaciones para este ítem dependiendo del número de fallas, cuanto mayor es el número de fallas mayor es la ponderación que se le da. Se considera un evento como falla cuando el paro de un equipo detiene todo o parte del proceso o procesos de la planta por un lapso mayor a 2 horas.

Tabla 3.1. Criterios para la determinación de la criticidad de los activos

<p align="center">Frecuencia de fallas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Parámetro mayor a 4 fallas/año 4 ▪ Promedio 2 – 4 fallas/año 3 ▪ Buena 1 – 2 fallas/año 2 ▪ Excelente menores de 1 falla/año 1 		<p align="center">Costos de Mantenimiento</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor o igual a 1500 USD 2 ▪ Inferior a 1500 USD 1 	
<p align="center">Impacto Operacional</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Parada inmediata de toda la Planta 10 ▪ Parada inmediata de la Línea de producción 8 ▪ Impacta en niveles de producción o calidad 6 ▪ Repercute en costos operacionales adicionales asociados a disponibilidad 3 ▪ No genera ningún impacto significativo sobre operaciones y producción 1 		<p align="center">Impacto en la Seguridad o Medio ambiente</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Afecta la seguridad humana tanto externa como interna 8 ▪ Afecta al medio ambiente produciendo daños reversibles 6 ▪ Afecta a las instalaciones causando daños severos 4 ▪ Provoca daños menores (Accidentes e incidentes) personal propio 2 ▪ Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no viola las normas ambientales 1 ▪ No provoca ningún tipo de daños a personas, instalaciones o al ambiente 0 	
<p align="center">Flexibilidad Operacional</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ No existe opción de producción y no existe equipo o función de repuesto 4 ▪ Existe equipo o función de repuesto compartido 2 ▪ Función de repuesto disponible 1 			

Impacto operacional: efectos causados en la producción o porcentaje de la producción que se ve afectada cuando ocurre la falla. Se tiene 5 posibles calificaciones dependiendo del grado de afectación que la falla tenga sobre la producción.

Flexibilidad operacional: es la posibilidad de realizar un cambio rápido para continuar con la producción sin incurrir en costos o pérdidas considerables. Se puede estimar con 3 posibles calificaciones considerando la existencia o no

de equipos o procesos redundantes, la mayor calificación corresponde a la situación en la que no existen los mismos.

Costos de mantenimiento: considerando todos los costos que implica la ejecución de la tarea de mantenimiento para la corrección de una determinada falla, dejando por fuera los costos inherentes a los costos de producción sufridos como consecuencia de la falla. Las dos posibles calificaciones están supeditadas al monto que la organización considera como razonable para que un activo tenga una mayor jerarquización en el presente análisis; al mayor monto la calificación es mayor.

Impacto en la seguridad o medio ambiente: este criterio está enfocado a evaluar los posibles inconvenientes que puede causar sobre las personas o el medio ambiente la ocurrencia de un evento considerado como falla. De los 6 posibles valores con los que se puede calificar este criterio, los de mayor cuantía corresponden a los que pueden provocar afectaciones a la seguridad de las personas.

Como se anotó anteriormente durante el desarrollo del modelo del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, el RCM confiere primordial atención a lo que tiene que ver con los impactos a la seguridad de las personas o al medio ambiente, pero tomando en cuenta que dichos impactos propios del proceso de producción no son significativos y, considerando que la organización tiene líneas de producción de funcionamiento continuo, al impacto a las operaciones se le ha dado un mayor peso para la determinación de la criticidad total, como se puede observar en la tabla anterior.

3.2.2.1.2. Lista Jerarquizada de Activos

Los cinco criterios para la determinación de la criticidad de los activos fueron aplicados durante una reunión preparatoria del grupo de revisión RCM, después de una breve capacitación sobre el método.

Al aplicar dichos criterios al método seleccionado se obtuvo la “Lista jerarquizada de los activos de la planta Molinos”, misma que se presenta en las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4:

Tabla 3.2. Lista jerarquizada de activos de la planta Molinos

No.	EQUIPO	FRECUENCIA	IMPACTO OPERACIONAL	FLEXIBILIDAD OPERACIONAL	COSTOS DE MANTT.	IMPACTO S/MA	CONSECUENCIAS	CRITICIDAD TOTAL	JERARQUIZACIÓN
1	Filtro Molienda MVRS 39/24	3	8	4	1	8	41	123	CRÍTICO
2	Tableros de distribución	3	8	4	1	8	41	123	CRÍTICO
3	Banco Polimec T4	3	8	4	2	0	34	102	CRÍTICO
4	Banco Ocrim C4	3	8	4	1	0	33	99	CRÍTICO
5	Banco Ocrim C7	3	8	4	1	0	33	99	CRÍTICO
6	Plansifter MPAJ	3	8	4	1	0	33	99	CRÍTICO
7	Plansifter MPAE	3	8	4	1	0	33	99	CRÍTICO
8	Filtro Sasores MVRN 52/24	2	8	4	1	8	41	82	CRÍTICO
9	Banco Polimec T1	2	8	4	2	0	34	68	SEMI CRÍTICO
10	Banco Polimec C1	2	8	4	2	0	34	68	SEMI CRÍTICO
11	Banco Ocrim T5 Fino	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
12	Banco Ocrim T5 Grueso	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
13	Banco Ocrim C10	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
14	Separador MTRA	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
15	Deschinatora (Despietradora)	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
16	Acondicionador de alta velocidad	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
17	Sasor 1/Sasor 4	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
18	Sasor 3/Sasor 8	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
19	Sasor 5/Sasor 6	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
20	Sasor 7/Sasor 2	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
21	Rotostar MPAJ	2	8	4	1	0	33	66	SEMI CRÍTICO
22	Filtro Limpieza MVRS 39/24	3	6	2	1	1	14	42	SEMI CRÍTICO
23	FlowBalancer MEAF	3	6	2	1	0	13	39	SEMI CRÍTICO
24	Cepillo BR1	3	6	2	1	0	13	39	SEMI CRÍTICO
25	Cepillo BR3	3	6	2	1	0	13	39	SEMI CRÍTICO
26	Transflowtron MWBG V-48	1	8	4	2	0	34	34	SEMI CRÍTICO
27	Banco Polimec T2	1	8	4	2	0	34	34	SEMI CRÍTICO
28	Banco Polimec T3	1	8	4	2	0	34	34	SEMI CRÍTICO
29	Banco Polimec D1	1	8	4	2	0	34	34	SEMI CRÍTICO
30	Transmisión M60: C4/C6-C8/D2	1	8	4	2	0	34	34	SEMI CRÍTICO
31	Transmisión M61: T5/T5g-C9/C10-C5/C7-D1	1	8	4	2	0	34	34	SEMI CRÍTICO
32	Banco Ocrim C8	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
33	Banco Ocrim D2	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
34	Transportador de tornillo helicoidal-M12	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO

Tabla 3.3. Lista jerarquizada de activos de la planta Molinos. Continuación...

No.	EQUIPO	FRECUENCIA	IMPACTO OPERACIONAL	FLEXIBILIDAD OPERACIONAL	COSTOS DE MANTT.	IMPACTO S/MA	CONSECUENCIAS	CRITICIDAD TOTAL	JERARQUIZACIÓN
35	Elevador de canchales No.1	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
36	Elevador de canchales No.2	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
37	Transportador de tornillo helicoidal-M26	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
38	Transportador transversal - M11	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
39	Elevador de canchales No.3	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
40	Despuntadora MHXS 30/60	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
41	Tarara	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
42	Esclusa Plansifter MPAJ-Paso T1	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
43	Esclusa Plansifter MPAJ-Paso T2	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
44	Esclusa Plansifter MPAJ-Paso T4	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
45	Esclusa Plansifter MPAJ-Paso T5	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
46	Esclusa Plansifter MPAJ-Paso D1	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
47	Esclusa Plansifter MPAJ-Paso C2	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
48	Esclusa Plansifter MPAJ-Paso C3	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
49	Esclusa Plansifter MPAJ-Paso C10	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
50	Esclusa Plansifter MPAJ-Paso D2	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
51	Esclusa Plansifter MPAE-Paso T3	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
52	Esclusa Plansifter MPAE-Agregado T3	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
53	Esclusa Plansifter MPAE-Paso DF	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
54	Esclusa Plansifter MPAE-Paso C4	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
55	Esclusa Plansifter MPAE-Paso DV1	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
56	Esclusa Plansifter MPAE-Paso C1	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
57	Esclusa Plansifter MPAE-Paso C5	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
58	Esclusa Plansifter MPAE-Paso C6	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
59	Esclusa Plansifter MPAE-Paso C7	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
60	Esclusa Plansifter MPAE-Paso C8	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
61	Esclusa Plansifter MPAE-Paso C9	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
62	Transportador - Recolector M73	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
63	Transportador - Recolector M75	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
64	Transportador - Recolector M74	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
65	Transportador - Recolector M76	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
66	Transportador - Recolector M72	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
67	Transportador - Recolector de Harina	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
68	Transportador de tornillo helicoidal-M77	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO

Tabla 3.4. Lista jerarquizada de activos de la planta Molinos. Continuación...

No.	EQUIPO	FRECUENCIA	IMPACTO OPERACIONAL	FLEXIBILIDAD OPERACIONAL	COSTOS DE MANTT.	IMPACTO S/MA	CONSECUENCIAS	CRITICIDAD TOTAL	JERARQUIZACIÓN
69	Transportador - Recolector de Sémola	1	8	4	1	0	33	33	SEMI CRÍTICO
70	Transportador de tornillo helicoidal-M22	2	6	2	1	0	13	26	NO CRÍTICO
71	Banco Ocrim C5	2	6	2	1	0	13	26	NO CRÍTICO
72	Banco Ocrim C9	2	6	2	1	0	13	26	NO CRÍTICO
73	Báscula Chronos G-50	1	6	4	1	0	25	25	NO CRÍTICO
74	Silos Harina	3	6	1	1	0	7	21	SEMI CRÍTICO
75	Acondicionador MYFA	1	8	2	2	0	18	18	NO CRÍTICO
76	Cepillo MKLA 30/80	2	4	2	1	0	9	18	NO CRÍTICO
77	Transportador de tornillo helicoidal-M05	1	6	2	1	2	15	15	NO CRÍTICO
78	Banco Polimec C3	1	6	2	2	0	14	14	NO CRÍTICO
79	Banco Polimec C2	1	6	2	2	0	14	14	NO CRÍTICO
80	Elevador de canjilones-M02	1	3	4	1	0	13	13	NO CRÍTICO
81	Báscula Tubex No.2	1	3	2	2	2	10	10	NO CRÍTICO
82	Separador Magnético No.1	1	4	2	1	0	9	9	NO CRÍTICO
83	Separador Magnético No.2	1	4	2	1	0	9	9	NO CRÍTICO
84	Banco Ocrim C6	1	4	2	1	0	9	9	NO CRÍTICO
85	Cepillo DF/DBr - MKZ 16/60	1	4	2	1	0	9	9	NO CRÍTICO
86	Filtro de Mangas MVRN 4/12	1	3	2	1	1	8	8	NO CRÍTICO
87	Depósito de Transflowtron	1	3	2	1	0	7	7	NO CRÍTICO
88	Esclusas M103 y M104	1	3	2	1	0	7	7	NO CRÍTICO
89	Bomba Centrífuga	1	3	2	1	0	7	7	NO CRÍTICO
90	Entóleter	1	3	2	1	0	7	7	NO CRÍTICO
91	Transportador de tornillo helicoidal-M107	1	3	2	1	0	7	7	NO CRÍTICO
92	Toiva de recepción	1	1	1	1	2	4	4	NO CRÍTICO
93	Transportador de paletas transversales-M03	1	1	1	1	0	2	2	NO CRÍTICO
94	Silos internos	1	1	1	1	0	2	2	NO CRÍTICO
95	Transportador de paletas transversales-M04	1	1	1	1	0	2	2	NO CRÍTICO
96	Silos de almacenamiento	1	1	1	1	0	2	2	NO CRÍTICO
97	Sin fin barredor	1	1	1	1	0	2	2	NO CRÍTICO
98	Transportador de paletas transversales-M07	1	1	1	1	0	2	2	NO CRÍTICO
99	Silos de acondicionado	1	1	1	1	0	2	2	NO CRÍTICO
100	Agregado T3 - Depósito	Temporalmente suspendido							

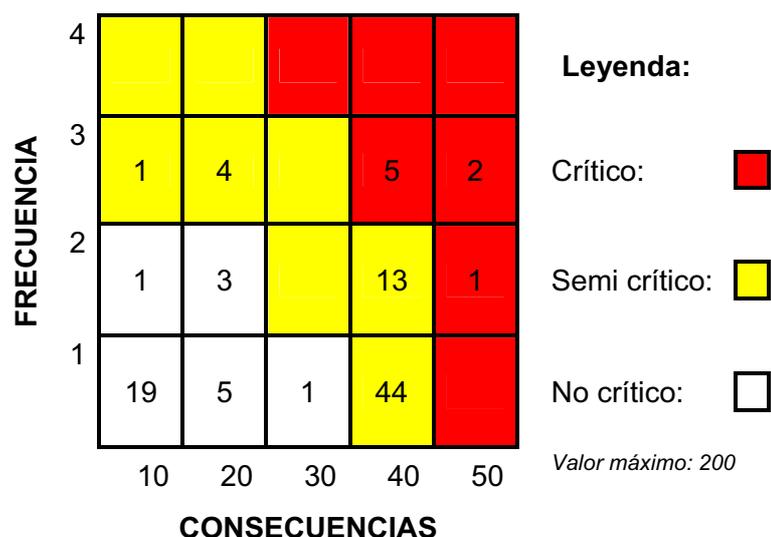
Como se puede observar en la lista jerarquizada de los activos de la Planta Molinos mostrada en las tablas anteriores, la mayoría de los equipos no tienen un impacto en la seguridad o medio ambiente, por lo que se obtiene tan solo tres equipos críticos que tienen este tipo de impacto; los otros equipos críticos guardan relación tanto con la frecuencia de sus fallas como con el impacto en las operaciones de la planta.

El resto de equipos, los semi críticos, tienen mayoritariamente un impacto directo sobre las operaciones, y su mayor o menor NPR tiene una directa relación con la frecuencia de sus fallas.

Los equipos signados como no críticos, tienen un impacto despreciable sobre las operaciones y/o su frecuencia de fallas es muy baja, por lo que es bastante probable que no sea necesario someterlos al proceso de RCM, por lo menos no durante el desarrollo de la presente investigación, considerada como un proyecto piloto.

Los resultados obtenidos en la lista jerarquizada de activos pueden presentarse en una "Matriz de jerarquización", la cual se muestra en la Tabla 3.5. En la misma se puede apreciar la ubicación de los activos en los diferentes niveles de criticidad (Crítico, Semi crítico y No crítico), como resultado de su frecuencia de fallas y de la severidad de las consecuencias.

Tabla 3.5. Resultados de Criticidad



Considerando los resultados obtenidos en la Lista jerarquizada de activos y la ubicación de los equipos en la Matriz de jerarquización, se puede decidir el orden específico en el cual someter al proceso de RCM a los equipos dentro de los niveles de criticidad “Crítico”, “Semi crítico” o “No crítico”, privilegiando una de las variables, esto es, “Consecuencias de las fallas” o “Frecuencia de las fallas”.

Para el presente análisis, el orden a seguir será el mismo obtenido en la Lista jerarquizada de activos, a menos que se cambie por decisión posterior consensuada en alguna de las reuniones del Grupo revisión RCM.

3.2.3. DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL

La planta Molinos se encarga de procesar el trigo para la obtención de la harina, sémola o semolina, que constituyen la materia prima de la planta de Pastificio. La planta cuenta con una capacidad instalada de 2000 Toneladas/mes; trabaja actualmente al 50% de dicha capacidad, con una producción aproximada de 1000 toneladas/mes, de las cuales tan sólo el 0,3% se destina para su venta directa. Al utilizarse prácticamente la totalidad de su producción para la planta de Pastificio, la planta Molinos constituye el primer gran eslabón dentro del macro proceso de producción de la organización.

3.2.3.1. Factores del Contexto Operacional

Para tener un claro entendimiento del contexto operacional de la planta Molinos, es necesario precisar los siguientes factores:

3.2.3.1.1. Procesos

La planta Molinos tiene 3 líneas de producción continua, con equipos interconectados e interdependientes, uno a continuación de otro. Cada una de estas líneas de producción tiene un funcionamiento autónomo, pero dependen de la respectiva materia prima que ingresa en cada uno de los tres subprocesos, a saber: Recepción, Acondicionamiento y Molienda.

3.2.3.1.1.1. Recepción

Este subproceso trabaja a una capacidad de 16 toneladas/hora, mediante el cual el trigo que llega a las instalaciones de Sucesores desde el puerto de

Manta o Guayaquil, es sometido a un control para permitir su ingreso a la planta o someterlo a un período de cuarentena. Posteriormente el trigo es transportado hacia los silos de almacenamiento (2 silos metálicos de 1000 toneladas cada uno) o hacia los silos internos (4 silos de cemento de 30 toneladas cada uno).

Si alguno de los equipos falla ocasionando el paro de este proceso, generalmente no existe ninguna afectación al proceso subsiguiente, el de acondicionado, a menos por su puesto que no exista trigo en los silos internos, lo cual hasta el momento no ha sucedido. Las consecuencias en todo caso pueden considerarse como de una mínima afectación al proceso de fabricación de semolina.

El proceso de recepción tiene un funcionamiento de lunes a viernes, o a sábado, dependiendo de las necesidades del macro proceso de producción, durante las horas que se requiera, para recibir alrededor de 280 toneladas/semanales, 2 a 3 transportes por día (mula=24 ton, trailer=42 ton). En períodos cuando los silos de almacenamiento están vacíos, lo cual sucede más o menos cada 6 meses, se recibe hasta 600 toneladas/semana.

La organización importa su máxima cantidad de almacenamiento de trigo (2000 toneladas), cuando las condiciones globales del mercado del trigo hacen que el precio de éste se encuentre en sus niveles más bajos. Al primer trimestre del 2009, por ejemplo, los precios se encuentran en niveles muy por debajo de los que alcanzaron en el último trimestre del 2008. Adquiriendo, algunas de las clases de trigo que importan, los siguientes precios FOB:

- Trigo argentino (suave): 268 USD/tonelada
- Trigo CWRS (semi durum): 358 USD/tonelada
- Trigo durum: 386 USD/tonelada.

3.2.3.1.1.2. Acondicionamiento

A una capacidad de 5 toneladas/hora, durante este subproceso el trigo es sometido a una limpieza y humidificación; se extraen cuerpos ferrosos, polvo, granos de trigo partidos, otros granos (maíz, soya, etc.) que vienen con el trigo, cáscaras y piedras; luego se lo somete a una humidificación controlada para

hacer más fácil la separación del endospermo (harina) de la cáscara en procesos subsiguientes. Finalmente el trigo humidificado es almacenado en los silos de acondicionado (4 silos de cemento de 30 toneladas cada uno), donde debe permanecer por lo menos 12 horas antes de pasar al proceso de Molienda. Generalmente el primer trigo que se procesa al inicio de cualquier semana tiene un tiempo de reposo de 22 horas y, los subsiguientes de 16 a 17 horas.

Ante un fallo de la mayoría de cualquiera de los equipos se para toda la línea, en cuyo caso, si existe suficiente trigo en los silos de acondicionado el proceso de molienda no se detiene, de lo contrario dicho proceso se detendría. Las consecuencias operacionales bajo este panorama podrían ser de consideración, porque además podrían detener el proceso de fabricación en alguna de las líneas de producción de la planta de pastificio, ante la falta de su materia prima. La falta de trigo acondicionado para continuar el proceso de molienda ha tenido una baja incidencia hasta el momento, pero su ocurrencia debe ser analizada a la luz de las consecuencias antes citadas. Por otro lado, la falta de tiempo de reposo antes que el trigo pase al proceso de molienda ocasiona una disminución de la calidad de la harina (granulometría, gluten, mayor contenido de cenizas) y una disminución de la extracción (mayores costos); adicionalmente, algunos de los equipos de molienda deben ser sometidos a un mayor esfuerzo mecánico, ya que es necesario comprimir el producto en un mayor grado para obtener el producto final dentro de los mínimos estándares requeridos.

El proceso de acondicionamiento funciona alrededor de 16 horas al día, de lunes a jueves, hasta procesar 60 toneladas/día; si falta alguna diferencia, se acondiciona el viernes por la mañana, para que dicho trigo tenga por lo menos algo de tiempo de reposo.

3.2.3.1.1.3. Molienda

A una capacidad de 4 toneladas/hora, este subproceso inicia con una extracción de granos partidos, granos bajo estándar de peso y, pequeñas impurezas y cuerpos ferrosos restantes. Luego el trigo es sometido a un proceso cíclico de triturar-cernir-comprimir-separar, hasta obtener el tamaño deseado, esto es, sémola y harina, de cuya mezcla se obtiene la semolina. Posteriormente

dichos productos son almacenados en los silos de harina (4 silos de cemento de 36 toneladas cada uno) o son extraídos manualmente en sacos.

El paro de todo el proceso puede darse por un fallo de la mayoría de cualquiera de sus equipos, pudiendo afectar a alguna de las líneas producción de pastificio, de no existir producto en los silos de harina. La incidencia de este tipo de consecuencias operacionales son muy bajas, ya que siempre existe producto en los silos de harina (la planta pastificio casi nunca se ha visto afectada por este tipo de consecuencias; de hecho, durante el tiempo que funciona la planta, en una sola ocasión se ha visto afectada por este tipo de consecuencias). Ante el paro de algunos de los equipos, se puede realizar, y de hecho actualmente se lo hace, un bay-pass, para permitir que el proceso siga funcionando, en cuyo caso es necesario considerar que el daño de algunos equipos ocasiona la disminución de ciertos estándares de calidad.

La Molienda procesa actualmente 240 toneladas/semana en 8 turnos (de 8 horas), o 270 toneladas/semana en 9 turnos (de 8 horas) de trabajo.

Uno de los principales parámetros a tener en cuenta durante todo el proceso de fabricación de semolina, y que se evidencia al final del proceso de Molienda es el “Nivel de extracción”, el mismo que debe ser igual o mayor al 78%, lo cual significa que si se procesa 240 toneladas de trigo se debería obtener por lo menos 187.2 toneladas de producto final (harina, sémola o semolina). Si bien el proceso de Molienda tiene un alto índice de afectación en el nivel de extracción, no se debe dejar de considerar la incidencia que tienen sobre el mismo la calidad de trigo que ingresa y el proceso de acondicionamiento.

Es necesario aclarar que la capacidad del proceso de fabricación de semolina, de 270 toneladas/semana como máximo, está dada por la capacidad de almacenamiento actual de los silos de harina (144 toneladas) ligada a la velocidad de procesamiento de las líneas de producción de la planta de Pastificio.

En las Figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 se puede apreciar los diagramas de flujo de estos tres subprocesos que componen el proceso de Fabricación de Semolina.

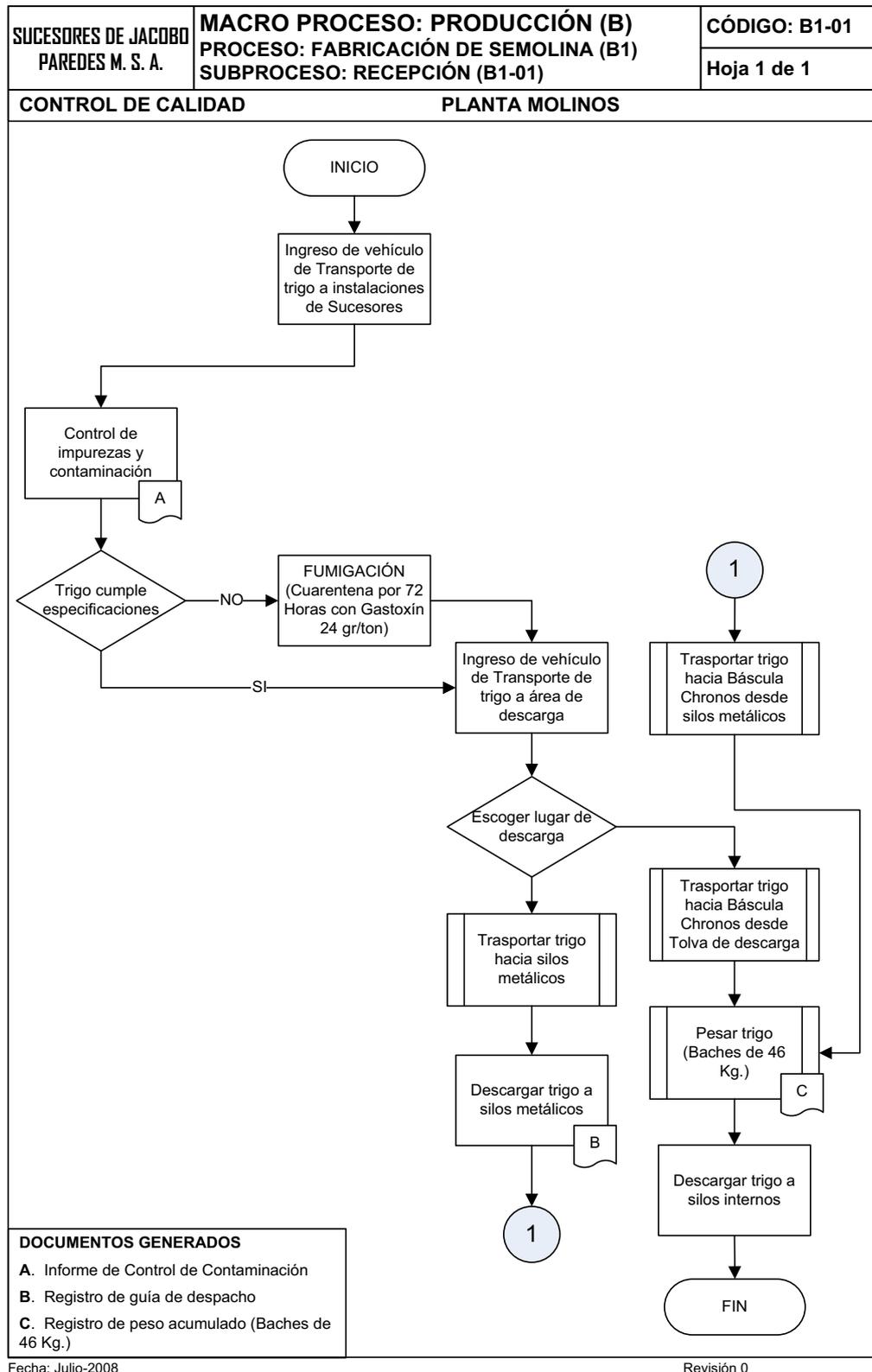


Figura 3.6. Diagrama del subproceso de Recepción

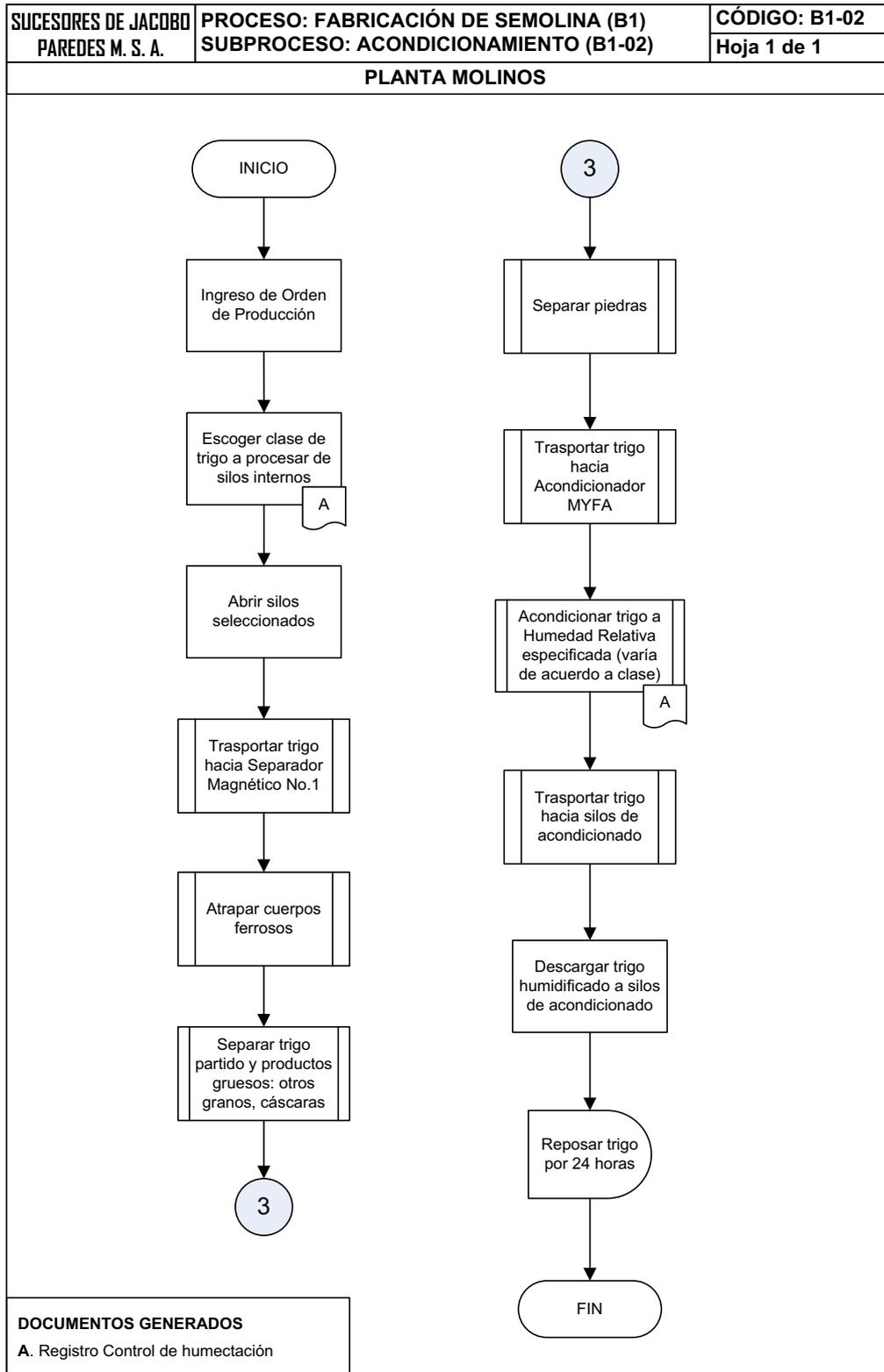


Figura 3.7. Diagrama del subproceso de Acondicionamiento

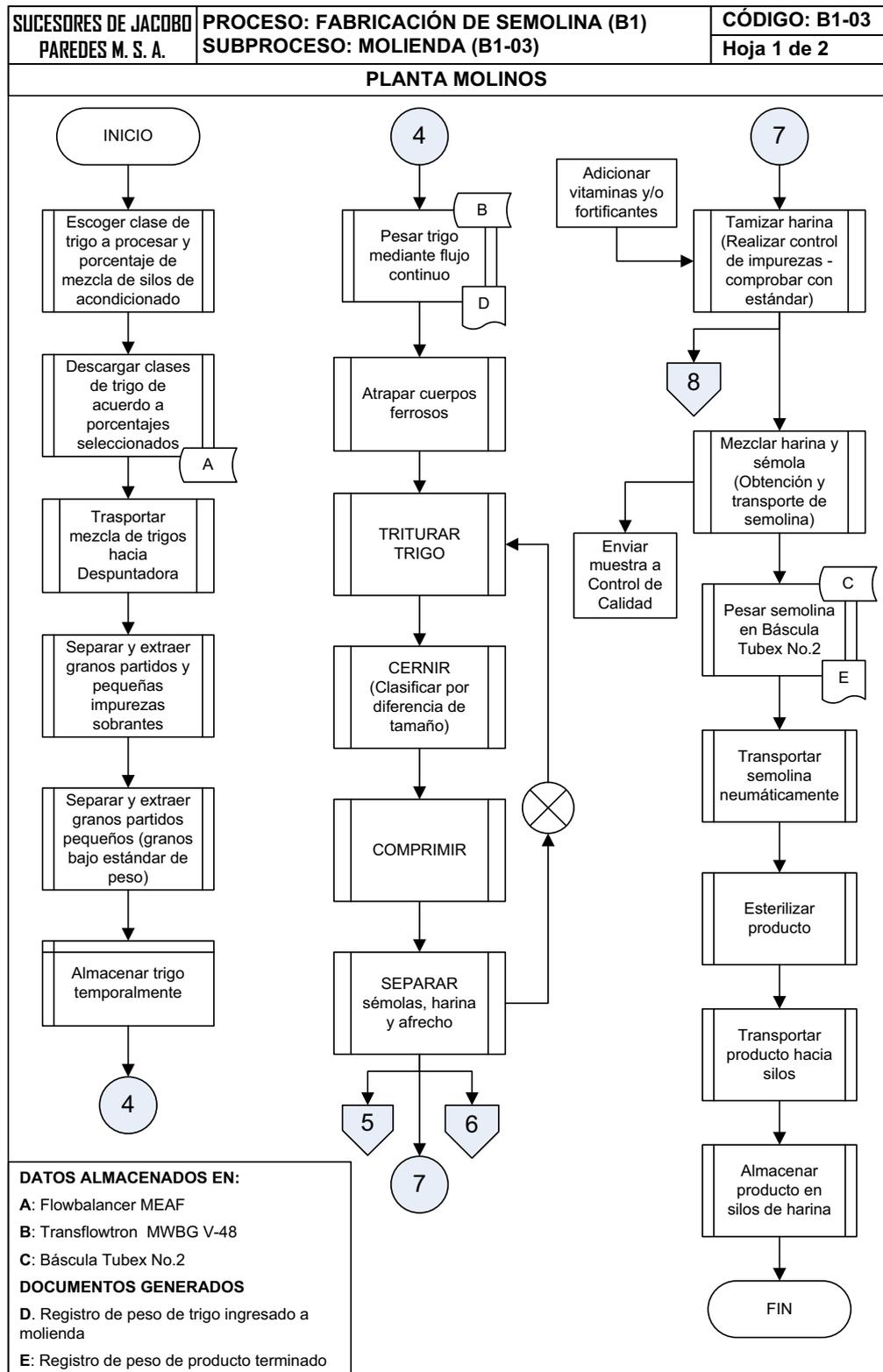
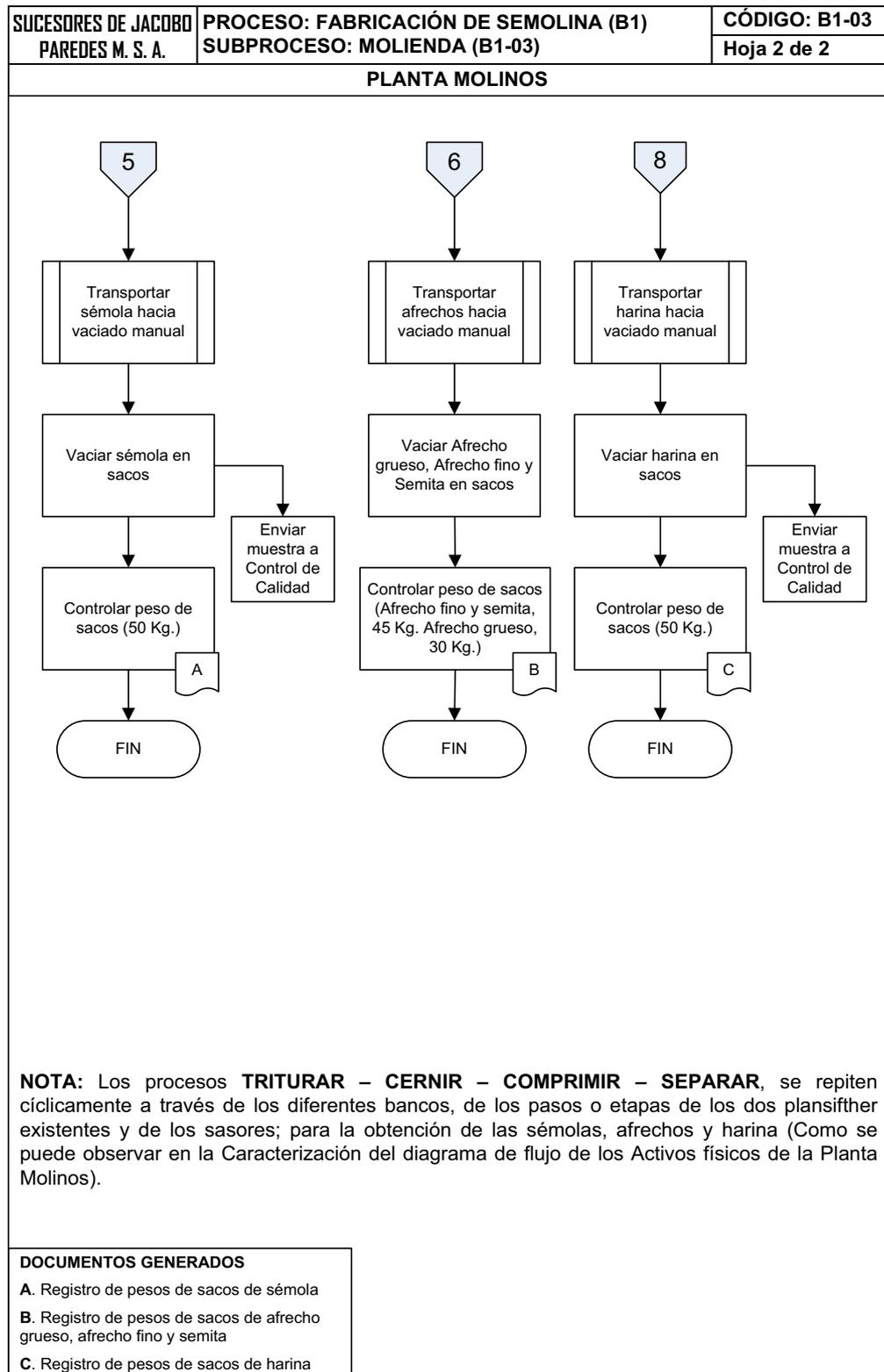


Figura 3.8. Diagrama del subproceso de Molienda



Fecha: Julio-2008

Revisión 0

Figura 3.9. Diagrama del subproceso de Molienda. Continuación...

3.2.3.1.2. Redundancia

La planta no cuenta con equipos redundantes que estén instalados dentro del proceso o que se mantengan como repuestos en un determinado almacén. En cuanto al funcionamiento de los procesos, existe la posibilidad de aislar ciertos equipos, cuando éstos se encuentran en falla, para continuar con el funcionamiento del proceso. Cuando se realizan este tipo de soluciones temporales, es necesario considerar cuidadosamente la incidencia que sobre la calidad del producto tiene la salida de dichos equipos.

3.2.3.1.3. Estándares de Calidad

La organización realiza una serie de monitoreo de algunos parámetros, para controlar los estándares de calidad del producto final que se obtiene en la Planta Molinos.

3.2.3.1.3.1. Estándares del trigo en la recepción

Los parámetros que la organización controla cuando se realiza la recepción del trigo se pueden observar en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Parámetros para la recepción del trigo

Denominación Parámetro	Observación
Peso hectolítrico	Mayor o igual a 75 puntos
% Humedad	Menor al 15%
Presencia plagas	
Granos buenos	
Granos chupados	
Granos contaminados	
Granos rotos	
Granos blancos	
Otras semillas	
Granza	
Materiales extraños	
Gluten seco	
Gluten húmedo	
Presencia de moho	

Datos proporcionado por el departamento de Control de Calidad de la empresa

La calidad del trigo que se recibe está dado por la clase de trigo, el tamaño del grano, contenido de impurezas (no puede superar el 10%), la humedad relativa y la proteína.

El **peso hectolítrico** se define como el peso en kilogramos de un volumen de grano de 100 litros, es un parámetro muy útil porque resume en un solo valor qué tan sano es el grano. Esto es importante porque cuanto más sano sea mayor será la proporción de almidón en el grano y mejor será la separación del endospermo del resto del grano. Por lo tanto, cuanto más sano, mayor extracción se podrá obtener. A su vez, es una medida de la homogeneidad de la partida de trigo, factor clave en el proceso industrial. Por consiguiente, el peso hectolítrico es una buena estimación tanto de la calidad física del grano, como de la calidad molinera.

3.2.3.1.3.2. Estándar del trigo acondicionado

El parámetro a monitorear al final del proceso de acondicionamiento es la humedad relativa del trigo, la cual debe tener los valores indicados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Humedad Relativa del trigo acondicionado

Clase Trigo	% Humedad Relativa
Trigo durum	15.2%
Trigo CWRS	14.5%
Trigo DNS	14.0%
Trigo argentino	13.5%

Datos proporcionados por el departamento de Control de Calidad de la empresa

3.2.3.1.3.3. Estándar del producto terminado

El producto terminado (harina, sémola o semolina), al final del proceso de fabricación de semolina que a la vez constituye el final del subproceso de molienda, debe tener los valores mostrados en la Tabla 3.8, para que mantenga el estándar de calidad exigido por la organización.

Tabla 3.8. Parámetros del producto terminado

Clase Trigo	% Humedad Relativa
Humedad relativa	No mayor al 14%
Gluten húmedo	Igual o mayor a 35%
Cenizas (impurezas)	Menor al 8%
Granulometría	Según producto

Datos proporcionados por el departamento de Control de Calidad de la empresa

La granulometría es el indicador del tamaño de las partículas que componen cada una de las clases de producto terminado (harina, sémola o semolina). Existen diferentes tamaños de partículas, medidas en micrones, que se relacionan con el porcentaje de su peso total, que identifican a cada una de las clases, como se puede observar en las Tablas 3.9, 3.10 y 3.11.

Tabla 3.9. Granulometría de la harina

Tamaño en micrones	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
355	0.17%	0.17%
300	0.25%	0.42%
200	0.67%	1.10%
150	6.04%	7.14%
132	7.09%	14.23%
112	13.06%	27.29%
Fondo	72.71%	100.00%

Datos proporcionados por el departamento de Control de Calidad de la empresa

Tabla 3.10. Granulometría de la sémola

Tamaño en micrones	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
475	19.31%	19.31%
355	75.21%	94.52%
300	4.98%	99.56%
200	0.32%	99.83%
150	0.02%	99.85%
132	0.05%	99.90%
Fondo	0.10%	100%

Datos proporcionados por el departamento de Control de Calidad de la empresa

Tabla 3.11. Granulometría de la semolina

Tamaño en micrones	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
355	10.96%	10.96%
300	11.71%	22.67%
200	11.41%	34.08%
150	6.65%	40.73%
132	4.65%	45.38%
112	5.80%	51.19%
Fondo	48.81	100%

Datos proporcionados por el departamento de Control de Calidad de la empresa

Los valores mostrados corresponden a resultados de análisis realizados en los laboratorios de control de calidad de la organización y evidencian la conformidad de los productos con los estándares de calidad. Por ejemplo, para que la sémola que se está produciendo se mantenga dentro de los estándares de calidad debe tener al menos el 16% de sus partículas sobre los 455 micrones o, la semolina debe tener más del 30% de sus partículas sobre los 150 micrones.

La variación en el tamaño de las partículas fuera de los estándares establecidos, evidencia un modo de falla específico de algunos de los equipos del subproceso de Molienda, por lo que debe ser considerado durante el análisis RCM de dichos equipos.

3.2.3.1.4. Estándares medio ambientales

Las operaciones de la organización están sujetas a la reglamentación emitida por la Dirección Metropolitana Ambiental del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito y, a las normativas concernientes del Ministerio del Ambiente. El Municipio de Quito a través de sus organismos pertinentes realiza anualmente una auditoria medioambiental a las operaciones de la organización.

Dentro de las operaciones de la Planta Molinos existe muy pocos equipos que provocan riesgos menores de contaminación por polvo, cuando se encuentran en estado de falla; por lo que, tales equipos deben ser considerados durante los análisis RCM.

3.2.3.1.5. *Riesgos para la seguridad*

Al igual que en el numeral anterior, la organización está obligada a cumplir con todas las reglamentaciones que por ley le corresponden, para disminuir o controlar los riesgos para la seguridad de los trabajadores, que actualmente existen durante el desarrollo de sus operaciones.

En las operaciones de la Planta Molinos existen contados equipos en los cuales cierto tipo de fallas podría provocar daños a la seguridad de las personas, estos deberán ser considerados durante los análisis RCM.

3.2.3.1.6. *Turnos de trabajo*

En la Planta Molinos trabajan alrededor de 10 personas, incluido el jefe de planta. Una persona trabaja en la recepción del trigo y el resto se distribuyen en los turnos, de acuerdo a las necesidades del proceso. Dependiendo del día de la semana los turnos (de 8 horas) se organizan de la siguiente manera:

- Lunes: Acondicionado, 2 turnos, 1 persona por turno; Mantenimiento a la planta, 1 turno, con el resto de personal.
- Martes: Molienda, 2 turnos, 3 ó 4 personas por turno; a partir de este día el Acondicionado es realizado generalmente por el Jefe de turno, como parte de sus funciones.
- Miércoles: Molienda, 2 turnos, 3 ó 4 personas por turno.
- Jueves: Molienda, 2 ó 3 turnos, de 3 ó 4 personas, dependiendo de los requerimientos del proceso.
- Viernes: Molienda, 2 turnos, 3 ó 4 personas por turno.

Por lo general, cuando se procesa harina o semolina en sacos, trabajan 4 personas por turno. Si alguna de las personas que trabajan en la Planta Molinos, por condiciones del proceso, no es requerido por el mismo, pasa a realizar labores en alguno de los procesos de la Planta de Pastificio.

3.2.3.1.7. *Productos en proceso*

Después de los subprocesos de Recepción y Acondicionamiento existen almacenamientos que constituyen el inicio del subsiguiente proceso, 120

toneladas en los silos internos para el inicio del Acondicionamiento y 100 toneladas en los silos de acondicionado para la Molienda. Como se citó anteriormente, tan sólo la falta de materia prima en alguno de estos almacenamientos podría provocar el paro de alguno de los subprocesos mencionados. Cualquier falla en un equipo que ocasione tales consecuencias deberá ser considerada durante el análisis RCM.

Cuando se detiene alguno de los subprocesos de la Planta Molinos por la falla de alguno de sus respectivos equipos, prácticamente no existe producto alguno que pueda considerarse como producto semielaborado en proceso. Cuando se produce un paro de la Molienda, en ocasiones en mayor o menor grado, existe producto que requiere ser reprocesado, pero que no puede considerarse como producto semielaborado en proceso.

3.2.3.1.8. Repuestos

Generalmente no existen repuestos importantes como piñones, bandas planas, rodillos, motores, moto reductores, repuestos neumáticos, etc.

Se tiene en existencia repuestos especializados como tarjetas electrónicas, bandas especiales (de paso); o repuestos de uso continuo como mangas, mallas, cedas, etc.

3.2.3.1.9. Demanda del mercado

La demanda para la Planta Molinos, como es de suponer, está ligada directamente a la demanda de la pasta en el mercado. Sin embargo, se produce mes a mes generalmente una cantidad aproximadamente igual durante todo el año, esto es, alrededor de 1000 toneladas/mes.

3.2.3.1.10. Abastecimiento de materias primas

El abastecimiento de la materia prima para el proceso de producción de la organización, el trigo, no constituye un factor que determine restricción alguna en la operación de la Planta Molinos. Los mercados del trigo desde donde se importa, proveen prácticamente durante todo el año con una variación en ocasiones de su costo, relacionado con la estación y época de cosecha.

Uno de los aspectos que se debe considerar es el mayor requerimiento de operación que tienen los equipos del subproceso de Recepción, cuando existe un incremento en la recepción de trigo, lo cual coincide con el vaciado de los silos de almacenamiento de trigo.

3.2.3.2. **Caracterización de los activos**

Uno de los aspectos más importantes del contexto operacional es el cabal entendimiento de cómo cada uno de los activos físicos interactúan con el entorno del proceso donde se encuentran funcionando.

Para que el grupo de revisión RCM tenga un documento que le permite ubicar rápidamente al equipo a ser analizado en su contexto operacional, se ha desarrollado la caracterización de los activos físicos en su diagrama de flujo de proceso, misma que es descrita en el Anexo V.

3.2.3.3. **Jerarquía de los activos**

Asociado al registro de planta de los activos actualmente existente, se ha diseñado un sistema numérico para facilitar la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en la organización.

El registro de planta trasladado a una jerarquía, permitirá identificar fácilmente cualquier sistema o activo, en cualquier nivel de detalle. El sistema numérico a seguir, en el ámbito de toda la organización, será el asignado en la Figura 3.10.

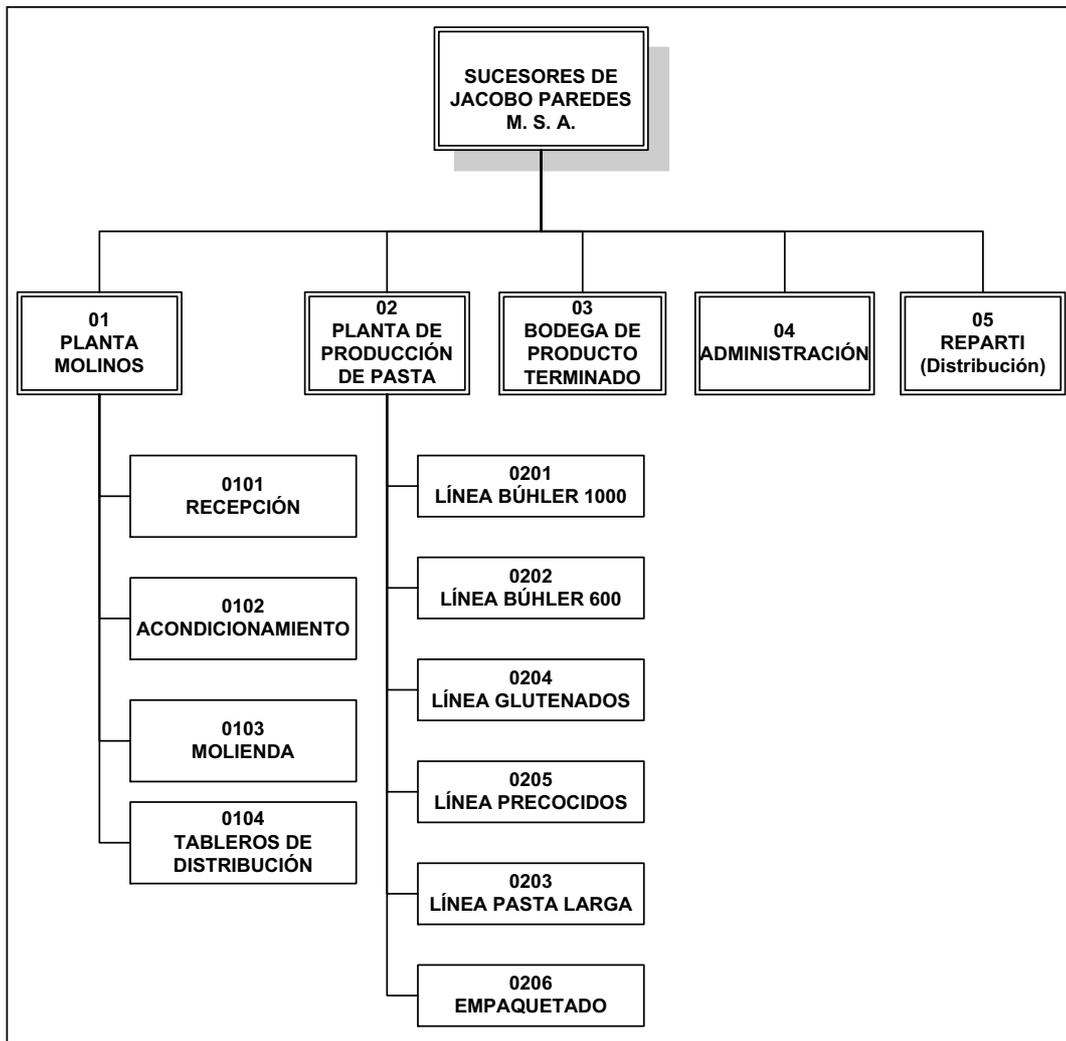


Figura 3.10. Jerarquía de los Activos de Sucosores de Jacobo Paredes M. S. A.

Aplicando dicho sistema numérico a los activos físicos de la Planta Molinos, tendremos las asignaciones mostradas en las Figuras 3.11, 3.12 y 3.13.

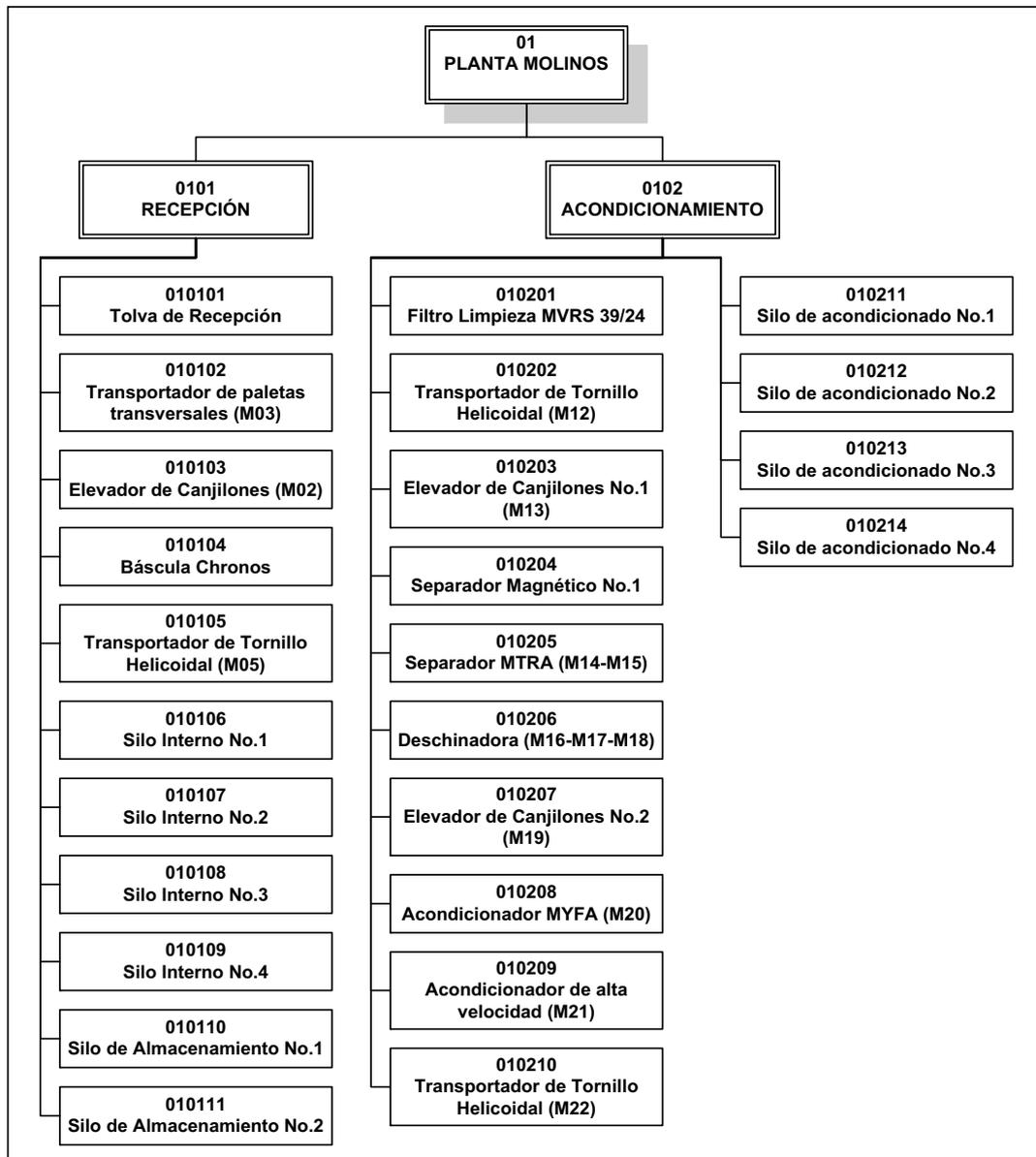


Figura 3.11. Jerarquía de los Activos de la Planta Molinos

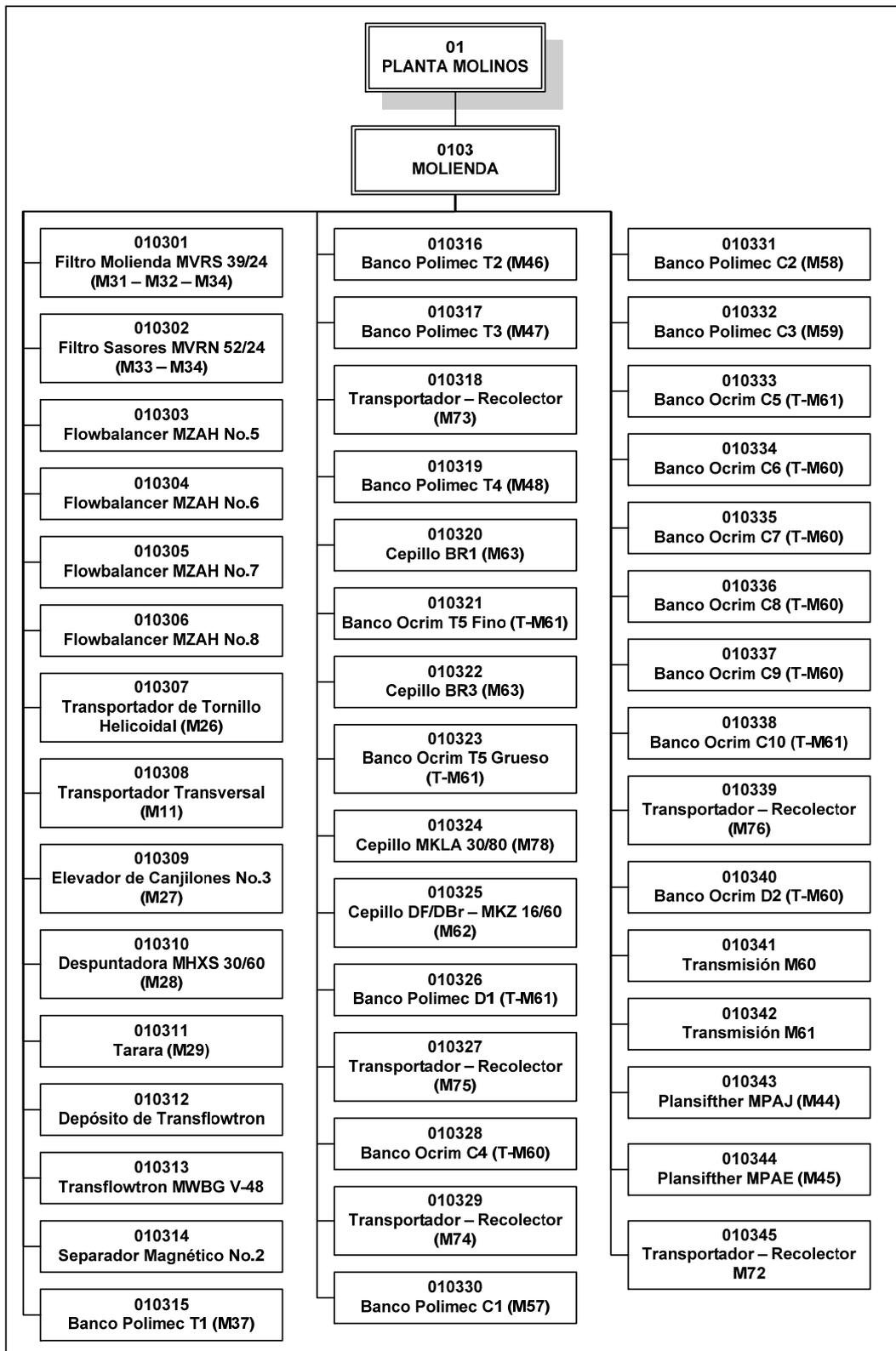


Figura 3.12. Jerarquía de los Activos de la Planta Molinos – Molienda

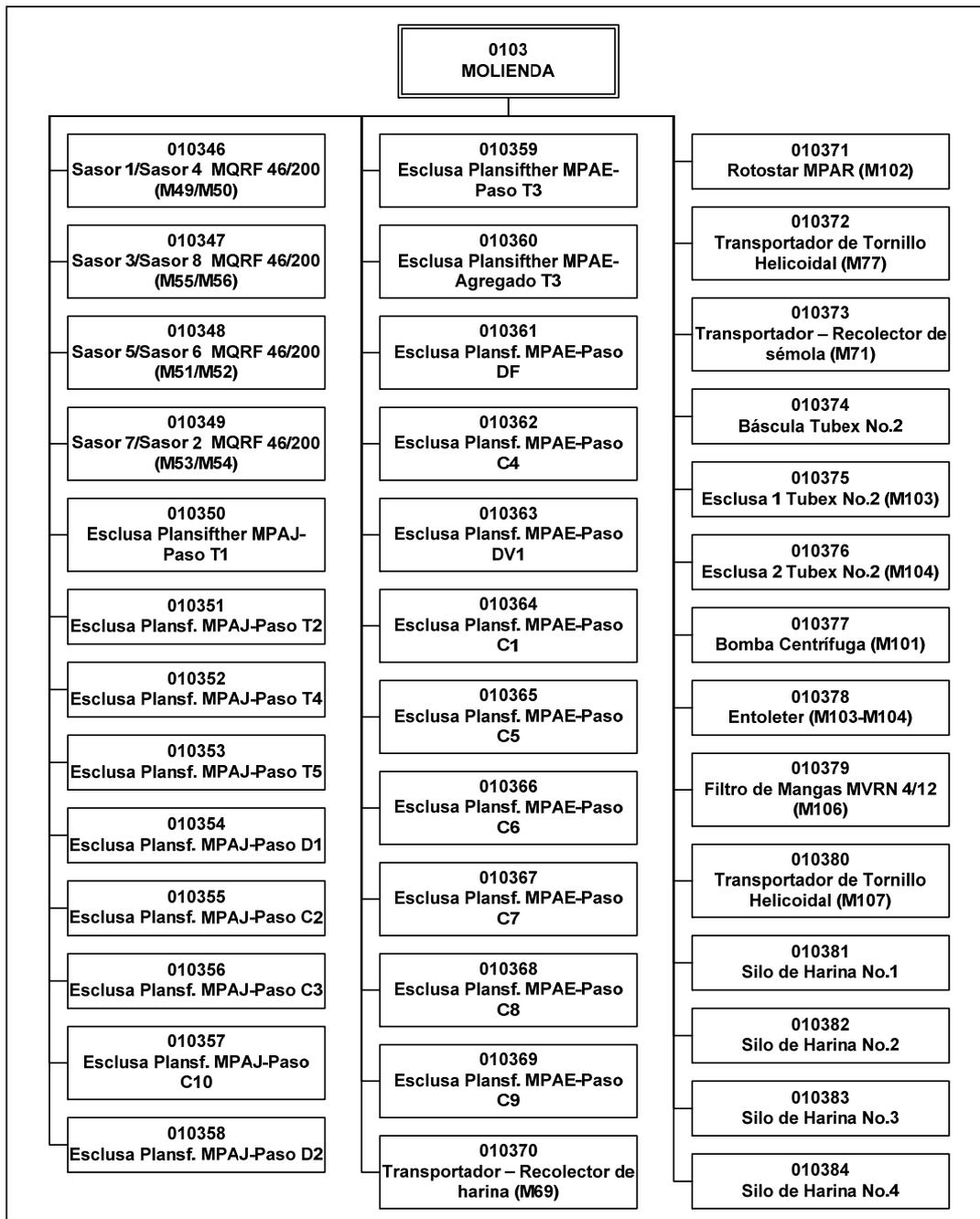


Figura 3.13. Jerarquía de los Activos Planta Molinos –Molienda. Continuación...

Si alguno de los activos a ser sometidos al análisis RCM, necesita bajar de nivel para la identificación de sus componentes, la asignación numérica seguirá hacia abajo en la jerarquía referente al activo en análisis.

3.2.4. GRUPO DE REVISIÓN RCM

Los recursos humanos facilitados por la organización para el desarrollo del proceso del presente proyecto, permiten la formación de un solo grupo de revisión RCM, el cual estará conformado por los siguientes miembros:

1. Facilitador (Director del proyecto)
2. Jefe de producción (Supervisor de Ingeniería)
3. Jefe de planta Molinos (Supervisor de Operaciones)
4. Jefe de mantenimiento
5. Operador planta Molinos
6. Técnico de mantenimiento

El grupo de revisión RCM así conformado se encargará del análisis de cada uno de los activos físicos seleccionados, para determinar los requisitos de mantenimiento de dichos activos, bajo la dirección y supervisión permanentes del facilitador.

3.2.5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD

Los activos físicos a ser sometidos al proceso RCM durante la presente investigación, serán algunos de los definidos como “equipos críticos” y otros como “semi críticos” durante el análisis de criticidad realizado a los activos de la planta Molinos, cuyos resultados se muestran en las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4. La selección de dichos activos así como el orden en el que se realizarán los análisis, fueron definidos en una reunión preparatoria realizada con gerencia de producción y la jefatura de la planta. Dichos activos son los siguientes:

1. Filtro de molienda MVRS 39/24
2. Plansifter MPAE
3. Banco Polimec T4
4. Banco Ocrim C4
5. Separador MTRA

6. Deschinadora

7. Flowbalancer

Las reuniones del grupo de revisión RCM se las realizó según el calendario establecido y entregado oportunamente a gerencia general, y bajo las reglas definidas para el efecto. Los puntos más importantes a considerar en tal sentido son los siguientes:

- Las reuniones se las realizará en la fecha y hora establecidas, en la sala de capacitación de la organización.
- Si una reunión debe ser postergada se notificará mínimo con un día de anticipación, y se trasladará a la próxima fecha establecida en el calendario.
- Las reuniones se realizarán con un quórum mínimo de 4 de sus miembros, aparte del facilitador, pudiendo estar ausentes únicamente el jefe de producción o el jefe de mantenimiento. Caso contrario no se realizarán y se postergarán para la próxima fecha.
- De acuerdo a la planificación, tomará entre dos y tres reuniones cada uno de los análisis de los equipos enumerados anteriormente; se realizará dos reuniones semanales, de 3 horas de duración aproximada cada una, por lo que todo el análisis le tomará al grupo de revisión alrededor de tres meses.
- El facilitador además de dirigir el desarrollo de los análisis, de acuerdo a las funciones establecidas en el numeral 2.1.10.3, establecerá los límites de los análisis para cada uno de los activos físicos seleccionados para el desarrollo del presente proyecto.

Bajo dichos preceptos, las reuniones del grupo de revisión se realizaron de acuerdo a lo planificado, con una duración aproximada de 4 meses para la culminación de los análisis de los equipos seleccionados.

Para cada uno de los activos analizados, previo a las reuniones del grupo de revisión RCM, se realizó una descripción general del equipo, además de un diagrama funcional del proceso del mismo.

3.2.5.1. Reuniones del grupo de revisión RCM

Las reuniones del grupo de revisión RCM se desarrollaron bajo la conducción permanente del facilitador, siguiendo los lineamientos descritos en los numerales 2.1.10.2 y 2.1.10.3, y tomando en cuenta en todo momento los criterios de la norma SAE JA1011.

El análisis de cada uno de los activos fue desarrollado siguiendo la siguiente secuencia de actividades:

1. Analizar el activo y su contexto operacional, mediante la revisión de los documentos preparados por el facilitador (descripción y diagrama funcional del proceso del equipo, y la “caracterización de los activos en su diagrama de flujo de proceso”), además de los manuales del equipo y registros existentes, cuando fuera necesario.
2. Elaborar la hoja de información RCM, describiendo claramente las funciones del activo, sus fallas funcionales, los modos de falla que ocasionan dichas fallas y la descripción de los efectos de la falla, tomando en cuenta en todo momento los lineamientos descritos en los numerales 2.1.3, 2.1.4 y 2.1.5 (AMFE). Esta parte del análisis es denominada generalmente como el “análisis de modos de falla y sus efectos AMFE” de los equipos.
3. Usando el “diagrama de decisión RCM” mostrado en la Figura 2.35 y siguiendo los lineamientos descritos en el numeral 2.1.8 decidir como tratar cada uno de los modos de falla indicados en la hoja de información.
4. Registrar en las primeras 13 columnas de la hoja de decisión RCM, la referencia del modo de falla en análisis, la evaluación de las consecuencias y el tipo de tarea proactiva o “acción a falta de” seleccionada para el tratamiento de ese modo de falla.
5. Finalmente registrar en las últimas 3 columnas de la hoja de decisión RCM, la descripción de la tarea proactiva o “acción a falta de” seleccionada, el intervalo inicial para la realización de dicha tarea y quién lo realizará. En el caso de haberse determinado la necesidad de un rediseño, su descripción general se la realizará en la columna de tarea propuesta.

Los pasos 4 y 5 deben ser realizados para cada modo de falla, y la selección de la tarea apropiada para tratar dicho modo de falla, así como la determinación de su intervalo inicial, debe ser realizada siguiendo los preceptos establecidos en los numerales 2.1.6 y 2.1.7.

Cuando los análisis de los equipos seleccionados hayan sido completados, el facilitador deberá preparar inmediatamente el archivo para la auditoría RCM.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para dos de los activos analizados, como ejemplo del método.

3.2.5.2. Filtro de molienda MVRS 39/24

La descripción de los equipos fue realizada a partir de los manuales de operación de los mismos y con la colaboración del jefe de planta del Molino.

El filtro de molienda es un sistema mediante el cual se transporta los productos en proceso desde la salida de los bancos y sasores, hacia la parte superior de los plansifter's. Está compuesto por:

- Neumático de alta presión
- Válvula maua
- Neumático de baja presión
- Sistema de aire de barrido
- Depósitos del sistema (inferior y superior,)
- Válvula de seguridad, la cual es compartida con el Filtro de sasores.

3.2.5.2.1. Neumático de Alta Presión

Es el equipo que genera primariamente el aire con la presión y caudal que se requiere para el transporte de los productos en proceso. Luego que los productos son transportados, el aire utilizado, el cual contiene una cierta cantidad de polvo de harina y otras partículas en suspensión, es llevado hacia la cámara o depósito inferior del sistema, desde donde se evacua libre de dichas partículas hacia la cámara superior a través de las 39 mangas que tiene el sistema, y desde ahí hacia el exterior. Está compuesto por un motor, una turbina (rodete) y las tuberías respectivas.

Este equipo se encuentra trabajando al momento al límite de su capacidad, esto es al 97.9% de su capacidad inicial. De hecho algunas tuberías de aspiración de limpieza interna de los bancos se encuentran cerradas, para que el equipo no trabaje con una eventual sobrecarga. Este sistema constituye por lo tanto un cuello de botella, puesto que no se podría incrementar en lo más mínimo la capacidad actual del proceso de molienda.

3.2.5.2.2. Válvula Maua

Es una válvula de mariposa que está ubicada a un metro adelante del neumático de alta presión. Su función es ayudar al arranque de dicho equipo, al apartar la carga durante el citado proceso; normalmente en estado de reposo está cerrada, luego que el neumático de alta presión arranca, la depresión que se genera en dicha válvula sumado al aire de baja presión que llega desde el compresor de barrido, provocan la apertura de la válvula, conectando la carga a la acción del sistema.

3.2.5.2.3. Neumático de Baja Presión

Este equipo ayuda a evacuar hacia el ambiente, el aire que llega a la cámara superior del sistema. Además ayuda a mantener los niveles de presión y caudal generados por el neumático de alta presión, en los estándares requeridos. Está compuesto por un motor, una turbina y las tuberías respectivas.

3.2.5.2.4. Sistema de aire de barrido

Está compuesto por un compresor (que genera el aire de barrido para los dos sistemas: Filtro de molienda y Filtro de sadores), una electrónica, un motor de pasos, 39 electro válvulas, 39 mangas y, un manómetro que indica permanentemente la presión existente dentro de la cámara inferior del sistema. El aire generado por el compresor es llevado en forma continua hacia la parte superior de las mangas; la electrónica crea pulsos que hacen que el motor de pasos active las electro válvulas, una a una en forma secuencial durante un lapso de tiempo, dado por la duración del pulso; cuando las electro válvulas se abren expulsan un violento chorro de aire en contra flujo, arrojando el polvo de harina o cualquier otra partícula que se encuentra adherida a la superficie exterior de la

manga hacia la parte inferior del depósito, desde donde dichas partículas vuelven al proceso. Como se puede notar, las mangas permiten que el aire que es expulsado hacia el exterior salga limpio, mientras que el aire que es generado por el compresor, que es inyectado momentáneamente en sentido contrario al aire de expulsión, mantiene tanto tiempo como sea posible las mangas limpias. La presión indicada por el manómetro va incrementándose paulatinamente, a medida que las mangas van perdiendo su capacidad de expulsión del aire que llega a la cámara inferior, hasta que la presión llega a niveles que se considera peligrosos, en cuyo caso las mangas deben ser necesariamente limpiadas mediante procedimientos establecidos. En condiciones normales de funcionamiento, las mangas son limpiadas aproximadamente cada 3 meses.

3.2.5.2.5. Depósitos del sistema

Los depósitos inferior y superior están constituidos en un solo cuerpo, y permiten la ejecución de las funciones señaladas anteriormente, así como el soporte de algunos de los componentes de los otros elementos.

3.2.5.2.6. Válvula de seguridad

Esta válvula funciona con los dos sistemas, filtro de molienda y filtro de sasores, y permite la evacuación de las sobre presiones momentáneas que se originan en los dos sistemas, por el aire generado por el compresor de barrido, y que no es utilizado por el proceso de limpieza de las mangas. Está compuesta básicamente por un diafragma, un émbolo y un resorte; su calibración para el desfogue dependerá del ajuste que se dé al tornillo del diafragma.

3.2.5.2.7. Límites del sistema

Los límites del sistema del filtro de molienda tomados en cuenta para el análisis por el grupo de revisión RCM, se puede observar en la Figura 3.14.

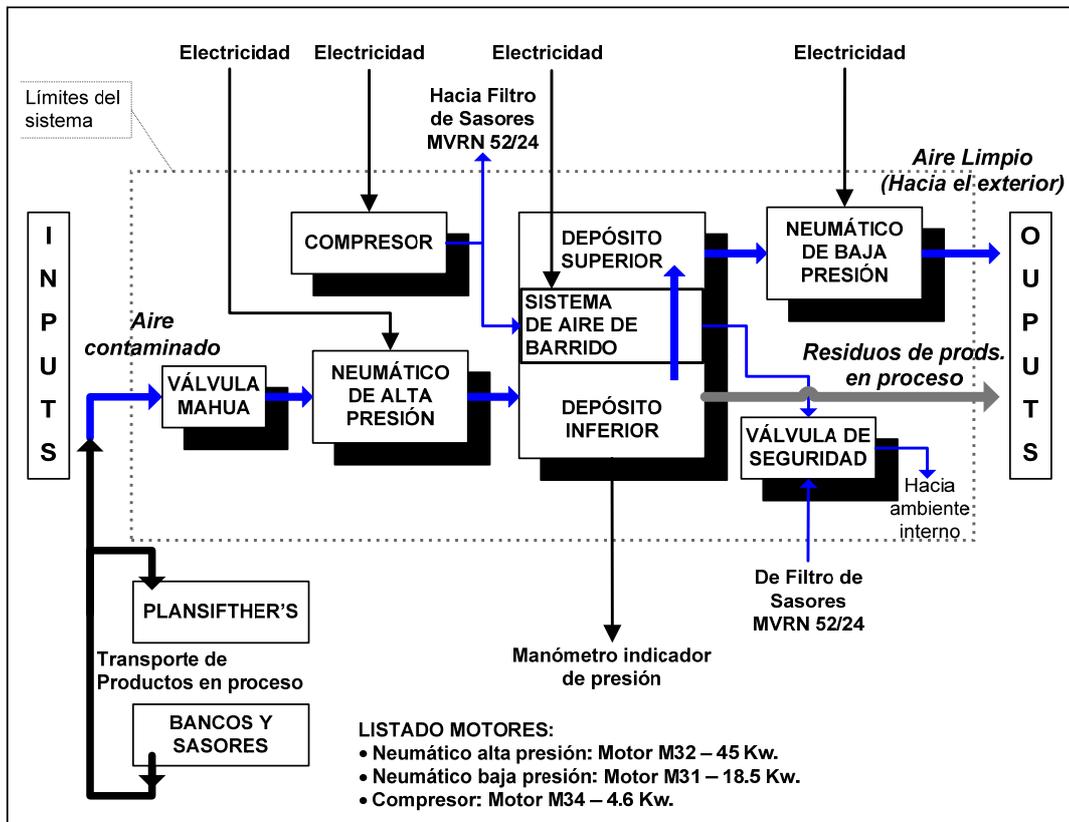


Figura 3.14. Diagrama funcional del proceso del sistema del Filtro de Molienda

3.2.5.2.8. Hojas de Información y Hojas de Decisión RCM

Las “hojas de información RCM” y las “hojas de decisión RCM” resultantes de los análisis realizados por el grupo de revisión RCM del filtro de molienda MVRS 39/24, al igual que el resto de documentos de los demás equipos, fueron sometidas al proceso de auditoría de RCM, el cual se citará más adelante.

A continuación se presentan los mencionados documentos, después de ser sometidos a la auditoría de RCM.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA FILTRO DE MOLIENDA MVR5 39/24		SISTEMA No. 010301	Facilitador: Ing. A. Navas	Fecha: Ene-09	Hoja No. 1
		SUBSISTEMA		SUBSISTEMA No.	Auditor: Ing. A. Aguinaga Ph.D Msc.	Fecha: Mar-09	de 3
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)	MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)			
1	A	No genera presión	1	Falla de Neumático de Alta Presión	Neumático de alta presión se analiza por separado		
			2	Falla de Neumático de Baja Presión	Neumático de baja presión se analiza por separado		
	B	Presión disminuye por debajo de 1.27 PSI y/o caudal disminuye por debajo de 3 metros cúbicos/segundo.	3	Válvula Maua falla en posición cerrada.	La válvula se queda cerrada. La válvula maua se analiza por separado. (Dicha válvula está ubicada a un metro adelante de la turbina de alta presión y se abre luego de que el filtro a arrancado, permitiendo la succión desde los niveles inferiores).		
			1	Mangas taponadas	Sistema de aire de barrido se analiza por separado		
			2	Desprendimiento de mangas	Sistema de aire de barrido se analiza por separado		
			3	Separación de tramos de tubería principal	Debido a la vibración propia del sistema, las manchetras (abrazaderas) se aflojan provocando la separación de los tramos de la tubería, la presión y el caudal bajan, el producto no puede ser succionado eficientemente, el aire se fuga hacia el ambiente, se producen taponamientos al inicio de las elevaciones (salidas de bancos y sasores). En los Bancos Ocrim el exceso de producto sale hacia los lados; en los bancos Polimec, si no se abre la compuerta frontal por la fuerza del exceso de producto los rodillos se detienen, la banda patina y puede llegar a quemarse (en alrededor de 1 minuto). Si se tiene repuesto se cambia la banda. Las manchetras se aseguran inmediatamente con el proceso en funcionamiento, toma unos pocos minutos realizar dicha tarea.		
			4	Pérdida de calibración de entradas de aire falso, demasiado abiertas	Las entradas de aire falso están ubicadas a lo largo de la tubería principal, cuando éstas se abren demasiado, la presión disminuye, el producto no puede ser elevado eficientemente o se deja de elevar, se provoca taponamientos; para cerrar dichas entradas, en funcionamiento, toma unos pocos minutos.		

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA FILTRO DE MOLIENDA MVRs 39/24		SISTEMA No. 010301	Facilitador: Ing. A. Navas	Fecha: Ene-09	Hoja No. 3
		SUBSISTEMA		SUBSISTEMA No.	Auditor: Ing. A. Aguinaga	Fecha: Mar-09	de 3
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)	MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)				
4	Evitar la sobre presión en el equipo	A	Sobre presión en depósito principal de equipo	2	Rotura de diafragma de válvula de seguridad	El aire saldría en forma continua con los mismo efectos que en el caso anterior. Si existe repuesto se cambia en unos 20 minutos; el trabajo tiene la posibilidad de ser realizado con el proceso en funcionamiento, aunque es recomendable hacerlo con el proceso detenido, por lo difícil de posicionar el diafragma debido a la constante presión existente en ese punto. El tiempo medio entre fallas (MTBF) de la ocurrencia de este modo de falla es de aproximadamente 5 años.	
				1	Mangas taponadas	El sistema de aire de barrido se analiza por separado	
				2	Ausencia de aire de barrido	El sistema de aire de barrido se analiza por separado	
				3	Falla de electrónica (control de electro válvulas para apertura de aire de barrido)	El sistema de aire de barrido se analiza por separado	
				4	Falla de la integridad del depósito	Este modo de falla tiene posibilidades casi nulas de ocurrir a lo largo de la vida útil del equipo, de hecho hasta el momento no ha sucedido; pero si se da el caso de su ocurrencia, no existiría mayores inconvenientes debido al nivel de presión que se maneja en condiciones normales de trabajo. MODOS DE FALLA COMO ESTE, sólo se citan como ejemplo, pero NO necesitan ser considerados en la Hoja de Decisión RCM, ya que no tienen prácticamente probabilidad de ocurrir a lo largo de la vida útil del equipo.	

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA		Facilitador:		Fecha:		Hoja No.	
		FILTRO DE MOLIENDA MVR5 39/24		Ing. A. Navas		Ene-09		1	
		SUBSISTEMA		Auditor:		Fecha:		de	
		NEUMÁTICO DE ALTA PRESIÓN		Ing. A. Aguinaga		Mar-09		2	
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA		EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)			
1	Generar la cantidad de aire requerido por el sistema (en presión y caudal), para el transporte de los productos en proceso.	A	Incapaz de generar aire	1	Motor quemado	El aislamiento del bobinado del motor falla y se produce su cortocircuito interno (el bobinado se quema). El polvo de harina en exceso al introducirse a los bobinados puede provocar la falla de los mismos. También puede ocurrir debido a una excesiva sobre corriente en el motor, por una sobrecarga del mismo, o a una sobre corriente en los de las fases del bobinado debido a una interrupción de la alimentación de voltaje en la fase restante. En cualquier caso dicha sobre corriente debería ser detectada por el término que protege este equipo, interrumpiendo su funcionamiento antes de que pueda llegar a quemarse. Este modo de falla, en los 10 años que lleva funcionando este sistema, no ha ocurrido; lo que de hecho ha sucedido es el paro del motor por acción de su protección (término), ante eventuales sobrecargas que han ocurrido.			
				2	Rodamientos agarratados debido a desgaste normal	Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento, pero de llegar a suceder, se esperaría que las sobre corrientes ocasionadas por el deterioro de los rodamientos sean detectadas por el término, para detener el motor antes de que se produzcan daños más severos. El accionamiento del término detendría automáticamente todo el proceso de molienda. Antes de la ocurrencia de este daño existiría un incremento de la vibración en la turbina (la que se encuentra montada directamente en la punta de eje de salida del motor), con un incremento de la temperatura en la caja de cojinetes o tapa frontal del motor. En el tiempo que lleva funcionando este equipo se ha cambiado los rodamientos una sola vez, aproximadamente a las 30,000 horas de funcionamiento (72 horas/semana x 52 semanas x 8 años). (Se cambió en agosto-2008, 2 rodamientos 6313)			
				3	Chaveta falla por fatiga	De llegar a ocurrir este modo de falla, el material de la chaveta se disgregaría en pequeñas limallas, que se quedarían atrapadas dentro del acoplamiento, la turbina se pararía, el motor seguiría funcionando, no existiría un incremento en el consumo de corriente, se detectaría porque o bien dejaría de transportar los productos en proceso, o bien bajaría la capacidad de transporte. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.			

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA		Facilitador:	Fecha:	Hoja No.
		FILTRO DE MOLIENDA MVRs 39/24				
FUNCIÓN		SUBSISTEMA		Auditor:	Fecha:	de
		NEUMÁTICO DE ALTA PRESIÓN				
FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA		EFECTO DE FALLA		
2	Proteger al motor contra eventuales sobrecargas	A	Incapaz de proteger al motor contra eventuales sobrecargas	1	Térmico mal calibrado	El término debe estar calibrado a 1.15% de la corriente de trabajo del motor. Si el término está calibrado en un valor menor al porcentaje indicado, probablemente detenga la operación del motor durante su arranque, o detenga su operación ante sobrecargas momentáneas que no justifican su paro. En el caso de que el término esté calibrado en un porcentaje mayor al valor indicado, no detendría el motor ante eventuales incrementos de corriente; el motor podría llegar a quemarse.
		4	Canal(es) chavetero(s) falla(n) por fatiga			De llegar a producirse este modo de falla, el desgaste progresivo del alojamiento de la chaveta de la punta de eje de salida del motor o del alojamiento de la turbina, provocaría en su etapa final un incremento en la vibración de la turbina, con un incremento de temperatura en la punta del eje, donde está el perno de sujeción de la misma. Este incremento del nivel de vibración posiblemente se evidenciaría en un incremento de la corriente de consumo del motor, por lo que probablemente el término detendría el funcionamiento del equipo y a la vez de toda la línea. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.
		2	Falla de término			Si llegara a ocurrir este modo de falla, el motor se quemaría debido a que no pararía ante incrementos prolongados de corriente, este sería bastante costoso para la organización puesto que se trata de un motor de una potencia bastante alta (33.81 Kw.). Esta falla no ha ocurrido hasta el momento.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA		Facilitador:		Fecha:		Hoja No.	
		FILTRO DE MOLIENDA MVR5 39/24		Ing. A. Navas		Ene-09		1	
		SUBSISTEMA		Auditor:		Fecha:		de	
		NEUMÁTICO DE BAJA PRESIÓN		Ing. A. Aguinaga		Mar-09		2	
SISTEMA No.		SUBSISTEMA No.		EFECTO DE FALLA					
010301		01030102		(Qué sucede cuando se produce una falla)					
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA		Efecto de falla			
1 Ayudar a mantener la presión requerida por el sistema y generada primariamente por el Neumático de alta presión, mediante la evacuación del aire utilizado que se acumula en el depósito inferior del sistema.		A Incapaz de evacuar el aire		1 Motor quemado		El aislamiento del bobinado del motor fallaría y se produciría un cortocircuito interno (el bobinado se quemaría). El polvo de harina en exceso al introducirse a los bobinados puede provocar la falla de los mismos. También puede ocurrir debido a una excesiva sobre corriente en el motor, por una sobrecarga del mismo, o a una sobre corriente en los de las fases del bobinado debido a una interrupción de la alimentación de voltaje en la fase restante. En cualquier caso dicha sobre corriente debería ser detectada por el término que protege este equipo, interrumpiendo su funcionamiento antes de que pueda llegar a quemarse. Este modo de falla, en los 10 años que lleva funcionando este sistema, no ha ocurrido.			
				2 Rodamientos agarratados debido a desgaste normal		Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento, pero de llegar a suceder, se esperaría que las sobre corrientes ocasionadas por el deterioro de los rodamientos sean detectadas por el término, para detener el motor antes de que se produzcan daños más severos. El accionamiento del término detendría automáticamente todo el proceso de molienda. Antes de la ocurrencia de este daño existiría un incremento de la vibración en la turbina (la que se encuentra montada directamente en la punta de eje de salida del motor), con un incremento de la temperatura en la caja de cojinetes o tapa frontal del motor. Durante el tiempo de funcionamiento que tiene este equipo, que es exactamente el mismo que el Neumático de alta presión, aún no se han cambiado sus rodamientos.			
				3 Chaveta falla por fatiga		De llegar a ocurrir este modo de falla, el material de la chaveta se disgregaría en pequeñas limallas, que se quedarían atrapadas dentro del acoplamiento, la turbina se pararía, el motor seguiría funcionando, probablemente no exista un incremento en el consumo de corriente, se detectaría porque o bien dejaría de transportar los productos en proceso, o bien bajaría la capacidad de transporte. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.			

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA		Facilitador:	Fecha:	Hoja No.
		FILTRO DE MOLIENDA MVRs 39/24				
FUNCIÓN		SUBSISTEMA		Auditor:	Fecha:	de
		NEUMÁTICO DE BAJA PRESIÓN				
		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)	MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)		
2	Proteger al motor contra eventuales sobrecargas	A	Incapaz de proteger al motor contra eventuales sobrecargas	4	Canal(es) chavetero(s) falla(n) por fatiga	De llegar a producirse este modo de falla, el desgaste progresivo del alojamiento de la chaveta de la punta de eje de salida del motor o del alojamiento de la turbina, provocaría en su etapa final un incremento en la vibración de la turbina, con un incremento de temperatura en la punta del eje, donde está el perno de sujeción de la misma. Este incremento del nivel de vibración posiblemente se evidenciaría en un incremento de la corriente de consumo del motor, por lo que probablemente el término detendría el funcionamiento del equipo y a la vez de toda la línea. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.
				1	Térmico mal calibrado	El término debe estar calibrado a 1.15% de la corriente de trabajo del motor. Si el término está calibrado en un valor menor al porcentaje indicado, probablemente detenga la operación del motor durante su arranque, o detenga su operación ante sobrecargas momentáneas que no justifican su paro. En el caso de que el término esté calibrado en un porcentaje mayor al valor indicado, no detendría el motor ante eventuales incrementos de corriente; el motor podría llegar a quemarse. Este equipo se encuentra trabajando al 80% de su capacidad inicial y generalmente no sufre sobrecarga alguna, por lo que prácticamente su término no ha detenido su funcionamiento en tales circunstancias.
				2	Falla de término	Si llegara a ocurrir este modo de falla, el motor se quemaría debido a que no pararía ante incrementos prolongados de corriente. Esta falla no ha ocurrido hasta el momento.

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA		Facilitador:		Fecha:		Hoja No.	
		FILTRO DE MOLIENDA MVR5 39/24		Ing. A. Navas		Ene-09		1	
		SUBSISTEMA		Auditor:		Fecha:		de	
		SISTEMA DE AIRE DE BARRIDO		Ing. A. Aguinaga		Mar-09		5	
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA		EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)			
1	Generar aire a 11 PSI para permitir la ejecución de la limpieza de las mangas de aspiración	A	Incapaz de generar aire	1	Motor quemado (de compresor)	Se produciría un cortocircuito interno (el bobinado se quemaría) ante una eventual falla del aislamiento del bobinado del motor. El polvo de harina en exceso al introducirse a los bobinados puede provocar la falla de los mismos. La falla de los bobinados puede ocasionarse también por una sobre corriente debido a una sobrecarga del equipo o debido a la interrupción de voltaje a una de sus fases, lo cual debería ser detectada por el térmico que protege este equipo, interrumpiendo su funcionamiento antes de que esto suceda. Este modo de falla no ha sucedido hasta el momento.			
				2	Rotura de bandas	Cuando las bandas están próximas a terminar su vida útil, sufren una elongación, lo que provoca que patinen durante su funcionamiento y se recalienten. Cuando se rompen las bandas el aire deja de llegar al sistema, por lo que la ocurrencia de este modo de falla se detecta por sonido, por la falta del aire de barrido, y porque el motor al trabajar sin carga (la bomba de émbolos rotativos) no produce el sonido característico de este tipo de equipos. Además, la ausencia de aire de barrido ocasiona que la válvula maua se cierre, se deja de transportar los productos en proceso con las consecuencias que ello conlleva. Finalmente, por alguno de dichos mecanismos todo el proceso de molienda se detendrá. Si existe los repuestos se cambia inmediatamente, sino se incrementaría el tiempo para conseguir el repuesto.			
				3	Rodamientos de motor agarrotados	Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento, pero de llegar a suceder, se esperaría que las sobre corrientes ocasionadas por el deterioro de los rodamientos sean detectadas por el térmico, para detener el motor antes de que se produzcan daños más severos. El accionamiento del térmico detendría automáticamente todo el proceso de molienda. Antes de la ocurrencia de este daño existiría un incremento de la vibración en el motor y un aumento de la temperatura en los alojamientos de los rodamientos, de las tapas de dicho equipo. Este modo de falla no ha sucedido hasta el momento. (Los rodamientos de este motor fueron cambiados en agosto/2008, 2 Rodamientos 6306).			

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA		Facilitador:		Fecha:		Hoja No.	
		FILTRO DE MOLIENDA MVR5 39/24		010301		Ing. A. Navas		Ene-09	
SUBSISTEMA		SISTEMA DE AIRE DE BARRIDO		Auditor:		Fecha:		de	
				Ing. A. Aguinaga		Mar-09		5	
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA		EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)			
		4	Válvula de seguridad en estado de falla (Cerrada)		La válvula de seguridad es un dispositivo que está ubicado a continuación de la bomba de émbolos rotativos, este dispositivo de protección debe actuar cuando la válvula de seguridad que sirve a los dos sistemas, Filtro de molienda y Filtro de sasores, ha fallado (en estado cerrada). Bajo estas condiciones, las sobre presiones momentáneas generadas por el propio funcionamiento de los sistemas, no pueden ser evacuadas como debe ser y el compresor pasa a funcionar con un aumento inadmisiblemente de la presión, pudiendo abrirse violentamente (romperse) la válvula de seguridad del compresor en el mejor de los casos, o pudiendo provocar daños a los controles de salida del aire de barrido de las mangueras de cualquiera de los dos sistemas. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.				
		5	Filtro de aspiración taponado		El filtro de aspiración es el conducto por donde ingresa aire a la bomba de émbolos rotativos, cuando éste se encuentra taponado, dependiendo de su grado de contaminación, la bomba va a ser incapaz de generar aire al no existir el ingreso del mismo al equipo, o disminuiría la presión del aire generado a niveles en los cuales el sistema no podría seguir funcionando. El filtro de aspiración se va taponando paulatinamente, pero en forma continua, debido al ingreso de contaminantes con el aire aspirado, el cual debe ingresar lo más limpio posible al interior de la bomba.				
		6	Falla de agregado de émbolos rotativos (bomba)		La ocurrencia de este modo de falla significaría la destrucción interna de la bomba de émbolos rotativos, misma que tiene dos cámaras embebidas en aceite. Este modo de falla podría ocurrir debido a la falta de lubricante (nivel bajo del mismo). También podría ser el resultado de una excesiva degradación del aceite, ocasionado por una falta de cambio del lubricante, o por una incorrecta selección del tipo (aceite 5W40). Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.				

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA		Facilitador:		Fecha:		Hoja No.	
		FILTRO DE MOLIENDA MVR5 39/24		Ing. A. Navas		Ene-09		3	
		SUBSISTEMA		Auditor:		Fecha:		de	
		SISTEMA DE AIRE DE BARRIDO		Ing. A. Aguinaga		Mar-09		5	
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA		EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)			
2	Generar los pulsos de barrido necesarios para la limpieza de las mangas	A	Incapaz de generar los pulsos de barrido	1	Fallo de electrónica	Ante una eventual falla de la electrónica, esta dejaría de generar los pulsos que requiere el motor de pasos para accionar las electro válvulas, por lo que la limpieza de las mangas no se efectuaría. Esta falla sería detectada por sonido, por la ausencia del barrido y por un accionamiento casi continuo de la válvula de seguridad. La falta de limpieza de las mangas, dependiendo del tiempo que funcione bajo estas condiciones el sistema, ocasionaría una disminución en el tiempo de operación entre limpiezas. La línea completa debe ser detenida tan pronto como se detecte este fallo. El cambio de la electrónica tomaría aproximadamente unos 30 minutos (Actualmente se tiene una electrónica de repuesto). Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.			
				2	Fallo de Motor de pasos	El paro del motor de pasos ocasionaría la ausencia de los pulsos necesarios para el barrido de las mangas, con iguales consecuencias a las anotadas en el ítem anterior. Luego de parar toda la línea, el cambio del motor tomaría alrededor de 2 horas (Actualmente se mantienen en stock un motor de repuesto). Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.			
				3	Banda de motor rota (Banda de sincronización)	Cuando se rompe la banda de sincronización, deja de haber los pulsos para el barrido de las mangas, las consecuencias son similares a los casos anteriores, este tipo de falla igualmente se detecta por sonido. Es necesario parar toda la línea para cambiar el repuesto, lo cual toma alrededor de 15 minutos. Este modo de falla ha ocurrido una sola vez durante el tiempo de operación del sistema (Julio/2004).			
		B	Incapaz de limpiar las mangas	1	Bobina de electro válvula quemada	La ocurrencia de este modo de falla no se detectaría normalmente. Se descubriría cuando se realice la limpieza de las mangas, la manga con la bobina quemada estaría mucho más sucia que el resto. El tiempo de operación entre limpiezas disminuiría, al aumentar prematuramente la presión de la cámara inferior del sistema. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.			

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA		Facilitador:		Fecha:		Hoja No.	
		FILTRO DE MOLIENDA MVR5 39/24		Ing. A. Navas		Ene-09		4	
		SUBSISTEMA		Auditor:		Fecha:		de	
		SISTEMA DE AIRE DE BARRIDO		Ing. A. Aguinaga		Mar-09		5	
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)		MODO DE FALLA		EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)			
				2		Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento, pero de llegar a suceder, los síntomas serían idénticos al caso anterior.			
				3		La ocurrencia de este modo de falla dejaría abierta en forma permanente la salida del aire de barrido hacia la manga de la electro válvula involucrada, la presión del aire de barrido no se elevaría para la limpieza de las subsiguientes mangas, cuyo proceso no se realizaría con la eficiencia requerida. Este tipo de fallo se detectaría por sonido. En este caso sería necesario parar la línea completa y desmontar la tapa superior hasta llegar a las electro válvulas, este trabajo tomaría alrededor de 8 horas. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.			
3		A		1		Las mangas se taponen prematuramente cuando las mismas ya están fuera de su vida útil, la cual es aproximadamente de un año, cuando son limpiadas cada 3 meses, sin esperar a llegar al límite de presión admisible. Si se disminuye el tiempo entre limpiezas, la vida útil de las mangas no se incrementa. La limpieza de las mangas se realiza cuando el manómetro indica una presión de 15 PSI como máximo, en la cámara inferior del sistema. La limpieza debe realizarse entre 14-15 Psi, dependiendo de la disponibilidad del tiempo.			
		B		1		Al desprenderse de su sitio de alojamiento una o más mangas, el aire que es expulsado al ambiente sale contaminado con partículas de harina u otros contaminantes del proceso y, disminuye la presión del Neumático de alta presión, lo cual indica la ocurrencia de este tipo de falla. Esto puede suceder por un mal ajuste de las abrazaderas de montaje de las mangas, después del procedimiento de limpieza. Para su solución es necesario parar toda la línea de molienda y proceder a desmontar las mangas que dificulten el apriete de la manga con este daño. Dependiendo de las condiciones en las que se produce este modo de falla y de cuánto disminuye la presión del Neumático de alta presión, se puede esperar para su reparación hasta el día lunes (día de mantenimiento) subsiguiente a su ocurrencia. Este modo de falla ha ocurrido una sola vez durante el tiempo de operación del sistema.			

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA FILTRO DE MOLIENDA MVR5 39/24		SISTEMA No. 010301	Facilitador: Ing. A. Navas	Fecha: Ene-09	Hoja No. 5	
		SUBSISTEMA		SUBSISTEMA No. 01030103	Auditor: Ing. A. Aguinaga	Fecha: Mar-09	de 5	
		SISTEMA DE AIRE DE BARRIDO		EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)				
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)	MODO DE FALLA						
		2	Rotura de mangas	La rotura de las mangas durante el funcionamiento del sistema, puede darse por la utilización de mangas fuera de su vida útil. Generalmente, las mangas que se encuentran fuera de su vida útil, tienden a romperse o descoserse ligeramente en sus costuras, lo que provoca su rotura durante el funcionamiento. Por regla, cuando las mangas llegan a una frecuencia de limpieza de un mes, son mangas que prácticamente ya no sirven, y deben ser desechadas.				
4	Indicar la presión en la cámara inferior del sistema.	A	Incapaz de indicar presión en la cámara inferior del sistema	1	Daño de manómetro	El manómetro indica la presión en la cámara inferior del sistema, y señala cuándo debe ser realizada la limpieza de las mangas (entre 14-15 Psi). Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.		
		2		2	Daño de manguera de interconexión	Pequeñas perforaciones podrían provocar una disminución de la presión en el manómetro, lo cual ocasionaría una indicación errónea de la presión, la lectura sería menor a la presión real, el equipo estaría en peligro al existir la probabilidad de su operación bajo presiones consideradas peligrosas, las mangas disminuirían su vida útil al incrementarse su tiempo entre limpiezas. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.		
5	Proteger al motor contra eventuales sobrecargas	A	Incapaz de proteger al motor contra eventuales sobrecargas	1	Térmico mal calibrado	El térmico debe estar calibrado a 1.15% de la corriente de trabajo del motor. Si el térmico está calibrado en un valor superior al indicado, el motor podría llegar a quemarse ante aumentos sostenidos de la carga, puesto que dicho dispositivo no detendría a tiempo la operación del equipo. Al momento este equipo se encuentra trabajando al 76% de su capacidad.		
		2		2	Falla de térmico	Si el motor es sometido a incrementos prolongados de corriente podría llegar a quemarse, debido a que su funcionamiento no se detendría por acción de su dispositivo de protección, puesto que éste se encontraría en estado de falla. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.		

HOJA DE INFORMACIÓN RCM		SISTEMA FILTRO DE MOLIENDA MVR3 39/24 SUBSISTEMA VÁLVULA MAUA				SISTEMA No. 010301	Facilitador: Ing. A. Navas	Fecha: Ene-09	Hoja No. 1
FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)	MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)					
1	Permitir el arranque del neumático de alta presión, con la succión a la carga cerrada.	A Incapaz de facilitar el arranque	1	Compuerta trabada en posición abierta	La compuerta de la válvula podría trabarse en posición abierta por atascamiento con algún cuerpo extraño, en estas condiciones el neumático de alta presión difícilmente arrancaría, posiblemente se dispare el término y tenga que revisarse el equipo. Mientras más abierta esté la válvula durante el arranque, mayor va a ser el consumo de corriente, por ello durante el arranque esta válvula debe estar completamente cerrada. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.				
2	Permitir el funcionamiento del sistema, luego de su arranque	A Incapaz de mantener el equipo en funcionamiento	1	Compuerta no se abre	Una vez que el equipo ha arrancado correctamente, la depresión existente en la pared de la compuerta de la válvula activa un mecanismo que a través del aire que llega desde el compresor de barrido, acciona la compuerta de la válvula hasta que esta queda completamente abierta. Bajo estas condiciones el equipo queda habilitado para seguir funcionando. Si la compuerta no se abre, el equipo se detiene inmediatamente, debido a que el interruptor de final de carrera que indica la posición de la compuerta, no da la señal de activación de la misma. Esta falla puede ocurrir debido a una incorrecta calibración de los componentes de la válvula o, debido a la ausencia del aire de activación que llega desde el compresor de barrido. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.				
3	Mantener la compuerta abierta durante la operación del sistema	A Incapaz de mantener la compuerta abierta	2	Interruptor de final de carrera no da la señal de apertura de la válvula	Una vez que la compuerta de la válvula se ha abierto, el interruptor de final de carrera debe enviar la señal de activación para que el sistema siga funcionando. Si su mecanismo de activación está mal calibrado o el interruptor falla como tal, el sistema inmediatamente se detendría y se interrumpiría el arranque de toda la línea. Este modo de falla no ocurrido hasta el momento.				
			1	Ausencia de aire de activación por falla de compresor	El flujo del aire de activación de la compuerta, que viene desde el compresor del aire de barrido, podría interrumpirse por una falla del mismo. Cuando la compuerta se cierra, la capacidad de transporte de los productos en proceso disminuiría en la misma proporción que el cierre de la misma, hasta que podría dejar de transportar completamente, ocasionando taponamientos y la línea finalmente se pararía. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.				
			2	Ausencia de aire por rotura de manguera	Una rotura de la manguera que transporta el aire de activación de la compuerta, provocaría su cierre total o parcial con iguales consecuencias al caso anterior. Este modo de falla no ha ocurrido hasta el momento.				

HOJA DE DECISIÓN RCM		SISTEMA FILTRO DE MOLIENDA MVRS 39/24 SUBSISTEMA										Facilitador:	Fecha:	Hoja No.
												Ing. A. Navas	Ene-09	1
												Auditor:	Fecha:	de
												Ing. A. Aguinaga	Mar-09	1
		TAREA PROPUESTA										Intervalo inicial		A
Referencia de información	FF	H	S	E	O	H1	H2	H3	Acción a falta de			Intervalo inicial		realizarse por
	F	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4	Intervalo inicial		realizarse por
1	B	3	S	N	N	S	N	S				Cada 6 meses		Operador
1	B	4	S	N	N	S	N	S				Anual		Operador
1	B	5	S	N	N	S	N	S				Cada 3 meses		Operador
3	A	1	S	N	N	S	N	S				Anual		Operador
3	B	1	S	N	N	S	N	S				Anual		Operador
3	B	2	S	N	N	S	N	S				Cada 4 años		Operador o mecánico
												Revisar las manchetas y/o anillos de sujeción (abrazaderas) de la tubería principal, de ser necesario ajustar.		
												Recalibrar y ajustar las dos entradas de aire falso ubicadas en la tubería principal.		
												Recalibrar y ajustar ingresos de aire a cada elevación, de acuerdo al porcentaje de producto en proceso a transportarse.		
												Recalibrar la válvula de seguridad, según procedimiento establecido (el procedimiento se encuentra detallado en el manual No. 65766 - Sp, pg. 18; en la medida de lo posible deberá trasladarse este procedimiento a un POE de la planta).		
												Cambiar membrana de válvula de seguridad, el desmontaje para dicho cambio debe ser realizado tomando las precauciones debidas para evitar la pérdida de componentes.		

HOJA DE DECISIÓN
RCM

SISTEMA
FILTRO DE MOLIENDA MVRS 39/24

Facilitador:
 Ing. A. Navas

Fecha:
 Ene-09

Hoja No.
 1

SUBSISTEMA

SISTEMA No.
 010301

Auditor:
 Ing. A. Aguinaga

Fecha:
 Mar-09

de
 1

NEUMÁTICO DE ALTA PRESIÓN

H1 H2 H3
 S1 S2 S3
 O1 O2 O3
 N1 N2 N3

1 A 1 S N N S N S

1 A 1 S N N S N S

1 A 2 S N N S S

1 A 2 S N N S S

Operador

1 A 3 S N N S N S

1 A 4 S N N S N S

2 A 1 N S

Eléctrico

2 A 2 N N N S

Eléctrico

ERROR: undefined
OFFENDING COMMAND: YRZJWH+ArialNarrow-Bold*1

STACK: