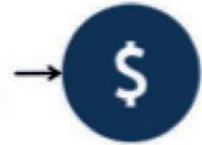


Expectativa
Financiera / Económica



Mantenimiento Industrial y su Administración



Carlos Alberto Montilla Montaña, Colombia 1971.
Candidato a Doctor, Magister en Sistemas automáticos de producción (UTP), Ingeniero Mecánico (UTP).

Profesor titular de la Facultad de Tecnología de la Universidad Tecnológica de Pereira. Ha sido catedrático en los programas de Tecnología e Ingeniería Mecánica, Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería de Manufactura.

Autor de los libros *Fundamentos de Mantenimiento industrial* y *Manual de prácticas de Instrumentación y control* (2009).

Ha publicado artículos en revistas especializadas nacionales e internacionales.

Pertenece al grupo de investigación en Procesos de manufactura y diseño de máquinas.

cmontilla@utp.edu.co

Mantenimiento Industrial y su Administración

Carlos Alberto Montilla Montaña



Universidad Tecnológica
de Pereira

Colección Textos Académicos
Facultad de Tecnología
2019

Montilla Montaña, Carlos Alberto
Mantenimiento industrial y su administración / Carlos Alberto
Montilla Montaña. – Pereira : Editorial Universidad Tecnológica
de Pereira, 2019.

489 páginas. Ilustrado -- (Colección Textos académicos).

e-ISBN: 978-958-722-391-0

ISBN: 978-958-722-390-3

1. Fábricas – Mantenimiento y reparación 2. Costos industriales
3. Plantas industriales – Mantenimiento 4. Análisis de ingeniería

CDD. 620.0046

Mantenimiento Industrial y su Administración

© Carlos Alberto Montilla M.

© Universidad Tecnológica de Pereira

Primera Edición, 2019

e-ISBN: 978-958-722-391-0

ISBN: 978-958-722-390-3

Textos Académicos

Universidad Tecnológica de Pereira

Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión

Editorial Universidad Tecnológica de Pereira

Coordinador editorial UTP

Luis Miguel Vargas Valencia

luismvargas@utp.edu.co

Tel:3137381

Edificio 9, Biblioteca Central “Jorge Roa Martínez”

Cra. 27 No. 10-02 - Los Álamos

Pereira, Colombia

www.utp.edu.co

Montaje y producción:

Universidad Tecnológica de Pereira

Recursos Informáticos y Educativos, CRIE

Reservados todos los derechos

A la Universidad Tecnológica de Pereira, a su personal estudiantil, profesoral y administrativo, quienes me han apoyado y me han permitido enriquecerme y crecer en todos los aspectos

Dedicado a mi Familia, seres queridos y a los estudiantes en general

“Yo dormía y soñaba que la vida era alegría. Me desperté y vi que la vida era servicio. Actué y he aquí que el servicio era la alegría”

R. Tagore

“Si no puedes trabajar con amor sino solo con desgana, mejor será que abandones el trabajo y te sientes a la puerta del templo a recibir las limosnas de los que trabajan con alegría”

Khalil Gibran

“Я хотел бы, чтобы память о тебе осталась во мне когда уйдёшь, как сияние восходящего солнца на берегах звездной тишины” (Quisiera que tu recuerdo quedara en mí cuanto te hayas ido, como ese refulgor del sol naciente en las orillas del estrellado silencio)”

P. Tagor

Tabla de contenido

Capítulo Uno	26
Nociones introductorias.....	27
1.1. Introducción	27
1.2. Definiciones básicas.....	27
1.2.1. Máquina y equipo	27
1.2.2. Fallas y estados asociados	28
1.2.3 Mantenimiento.....	29
1.2.4 Empresa.....	32
1.2.5 Ejemplo para aclarar algunas definiciones básicas	32
1.3 Objetivos básicos del mantenimiento.....	35
1.3.1. Reducir las fallas funcionales (paradas imprevistas) de los equipos, y los costos asociados a ellas	35
1.3.2 Asegurar unos costos operativos razonables de los equipos, y procurar mejoras de ellos	36
1.3.3 Maximizar la inversión en Planta y equipos, asegurando el cumplimiento de mínimo su vida útil esperada.....	38
1.3.4 Garantizar que las máquinas/equipos operen de manera segura para los usuarios y para el medio ambiente	42
1.4 Acciones básicas del mantenimiento	42
1.5 Sistemas de mantenimiento	43
1.5.1. Mantenimiento Correctivo o a la falla o de emergencia CM (Corrective Maintenance).....	43
1.5.2. Mantenimiento Programado	45
1.5.3. Mantenimiento Preventivo PM (<i>Preventive Maintenance</i>).....	47
1.5.4. Mantenimiento Predictivo PdM (<i>Predictive Maintenance</i>)	47
1.5.5. Mantenimiento Productivo Total TPM (<i>Total Productive Maintenance</i>)	50
1.5.6. Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM (<i>Reliability Centered Maintenance</i>)	51
1.5.7. Mantenimiento Basado en el Riesgo RBM (<i>Risk Based Maintenance</i>).....	52
1.6. Evolución histórica del Mantenimiento.....	53
1.7. ¿Cuándo reemplazar un equipo de producción?	57
1.8. Preguntas de consulta o análisis.....	61
1.9. Para reflexionar. Mantenimiento ¿Una vía de escape al subdesarrollo?	62
Capítulo Dos.....	67
Organización del departamento de Mantenimiento	68
2.1. Introducción	68
2.2. Algunas definiciones básicas	68
2.2.1. Relativas a empresas.....	68
2.2.2. Definiciones relativas a cargos relacionados con Mantenimiento.....	71

2.3. Ubicación de la función Mantenimiento dentro de la empresa.....	72
2.4. Algunas estructuras típicas de los departamentos de mantenimiento.....	75
2.5. Preguntas de consulta o análisis.....	77
2.6. Para reflexionar. Funciones genéricas del Ingeniero y del Tecnólogo de mantenimiento en Colombia	77
Capítulo Tres	80
Mantenimiento preventivo (<i>Preventive Maintenance</i>)	81
3.1. Introducción	81
3.2. Pasos para implementar un plan de mantenimiento preventivo	84
3.2.1. Inventario de equipos, inmuebles y vehículos	84
3.2.2. Codificación de los equipos.....	86
3.2.3. Creación de la Tarjeta Maestra de Datos TMD, para cada máquina/equipo88	
3.2.4. Creación de las Hojas de Vida de máquinas/equipos	93
3.2.5. Relación de requerimientos de Mantenimiento.....	92
3.2.6. Instructivos de Mantenimiento.....	92
3.2.7. Programación (<i>Tablero de Control</i>).....	96
3.2.8. Rutinas básicas de Mantenimiento RBM.....	99
3.2.9. Formatos y documentación básica para la administración del mantenimiento.....	106
3.2.10. Software de mantenimiento CMMS.....	110
3.2.11. Dinámica de operación del Mantenimiento Preventivo.....	116
3.3. Preguntas de consulta o análisis.....	116
3.4. Para reflexionar: el mantenimiento en Risaralda y la competitividad	114
Capítulo Cuatro.....	127
Mantenimiento predictivo PdM.....	128
4.1. Introducción	128
4.2. Ensayos termográficos.....	130
4.3. Prueba de líquidos o tintas penetrantes	134
4.4. Medición y análisis de vibraciones.....	136
4.4.1. Algunos términos y definiciones	137
4.4.2. Efectos de las vibraciones.....	141
4.4.3. Medición y control de la Vibración	143
4.5. Ensayo de Ultrasonido (<i>técnica de inspección volumétrica</i>).....	148
4.6. Análisis de aceites en uso	157
4.7. Industria 4.0, fábrica inteligente y e-Maintenance.....	161
4.7.1. Industria 4.0.....	161
4.7.2. Fábrica inteligente.....	165
4.7.3. Mantenimiento basado en la condición MBC u on-condition.....	166
4.7.4. e-Maintenance.....	167

4.8. Un estudio de caso. Análisis de falla en rodamiento de motor eléctrico en ladrillera (Cartago - Valle del cauca), con prueba combinada de balanceo y análisis termográfico.....	168
Capítulo Cinco	173
Mantenimiento Productivo Total TPM.....	174
5.1. Introducción	174
5.2. Siglas y términos a tener en cuenta en TPM	175
5.3. Origen y evolución del TPM.....	175
5.4. Los ocho pilares fundamentales del TPM.....	178
5.5. Las cinco eses o 5S.....	180
5.6. Mantenimiento autónomo	184
5.6.1. Objetivos del Mantenimiento Autónomo	184
5.6.2. Pasos para la implementación del Mantenimiento autónomo.....	185
5.7. Fases y etapas en la implementación del TPM	191
5.8. Observaciones respecto del TPM	192
Capítulo Seis.....	193
Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM.....	194
6.1. Introducción	194
6.2. Siglas y términos a tener en cuenta en RCM.....	194
6.3. Origen y evolución del RCM	196
6.4. Metodología de aplicación	200
6.4.1. Efectuar un Análisis de criticidad CA	200
6.4.2. Determinar la criticidad de los subsistemas	201
6.4.3. Toma de decisiones a partir de los análisis arrojados.....	203
6.4.4. Ventajas de aplicar RCM	206
6.4.5. RCM y TPM como sistemas de mantenimiento complementarios.....	209
6.5. Ejercicio propuesto	209
6.6. Caso de estudio. Ejemplo de aplicación parcial de RCM.....	210
Capítulo Siete	217
Mantenimiento Basado en el Riesgo RBM.....	218
7.1. Introducción	218
7.2. Algunos antecedentes del manejo del riesgo	219
7.2.1. Normatividad sobre riesgo en instalaciones industriales	219
7.2.2. Algunos mega-accidentes previos a las convenciones	219
7.2.3. Algunas Premisas en RBM.....	225
7.3. Algunos términos y definiciones para tener en cuenta en RBM	225
7.4. Metodología general para la definición y aplicación de un plan de mantenimiento RBM	225
7.5. Explicación de la actuación de un SIS	231
7.6. Algunas normas y estándares relacionados con prevención y manejo del riesgo	235

7.7. Estudio para determinar madurez de las empresas del área metropolitana en cuanto a RBM	236
7.8. Tema de consulta y reflexión	245
Capítulo Ocho.....	247
Salud ocupacional y Seguridad Industrial	249
8.1. Definiciones generales.....	249
8.2. Salud Ocupacional S. O.	241
8.2.1 Antes de la realización de trabajos.....	258
8.3. Algunas estadísticas de accidentalidad laboral en Colombia.....	263
8.4. Algunos tips de Salud ocupacional y Seguridad Industrial.....	267
8.5. Manejo de residuos peligrosos RESPEL.....	269
Capítulo Nueve.....	273
La mantenibilidad y la ejecución de tareas de mantenimiento	274
9.1. Introducción	274
9.2. Pautas generales para comprender un proceso / máquina o equipo.....	274
9.3. Mantenimiento de preparación.....	275
9.4. Mantenibilidad	277
9.5. Recomendaciones de mantenimiento alrededor de los elementos estandarizados e intercambiables	283
Capítulo Diez.....	285
Fundamentos de lubricación.....	286
10.1. Introducción	286
10.2. Definiciones básicas.....	286
10.2.1. Tribología.....	287
10.2.2. Fricción.....	287
10.2.3. Desgaste.....	287
10.2.4. Viscosidad	288
10.2.5. Lubricante	290
10.2.6. Lubricar	290
10.2.7. Algunas siglas importantes a tener en cuenta.....	292
10.3. Propiedades generales de los lubricantes, clasificaciones y nomenclaturas	292
10.3.1. Propiedades y características generales de los lubricantes	292
10.3.2. Clasificaciones y nomenclaturas de los aceites.....	296
10.3.3. Clasificaciones y nomenclaturas de las grasas.....	303
10.3.4. Clasificaciones y nomenclaturas de los líquidos de frenos.....	306
10.4. Aspectos relativos al proceso de lubricación.....	306
10.4.1. Cantidad adecuada	307
10.4.2. Momento adecuado	309
10.4.3 Sistemas o métodos de lubricación.....	309

10.4.4. Campo de aplicación de los métodos de lubricación.....	317
10.4.5. Aspectos prácticos de la lubricación: seleccionar, operar y mantener	317
10.5. Preguntas de consulta, análisis, ejercicios.....	320
10.5.1. Para un rodamiento 6220.C3.....	320
10.5.2. Consulte y describa gráficamente	320
10.5.3. Consulte y describa la operación.....	320
10.6. Un estudio de caso.	320
Capítulo Once.....	326
Selección de un modelo o política de Mantenimiento	327
Capítulo Doce.....	334
Mantenimiento analítico (<i>indicadores e índices</i>).....	335
12.1. Introducción	335
12.2. Índices de gestión de mantenimiento.....	336
12.2.1. Indicadores de Eficacia del Mantenimiento	338
12.2.2. Indicadores de Administración del Mantenimiento	338
12.2.3. Indicadores de Costos del Mantenimiento.....	340
12.2.4. Ejemplo de cálculo de indicadores	342
12.3. Fuentes de información para la elaboración de índices.....	347
12.4. Algunos indicadores de producción relacionados con mantenimiento	348
12.4.1. Partes de desgaste P. D.....	348
12.4.2. Partes de recambio.....	348
12.4.3. Combustibles.....	349
12.5. Índices de fallas	349
12.5.1. Análisis de Pareto	349
12.5.2. El Diagrama de Causa – Efecto, o Diagrama de Ishikawa o Espina de Pescado o de las 5M	354
12.6. Preguntas de consulta o análisis y ejercicios propuestos	357
12.7. Para reflexionar. un estudio de caso en la empresa colombiana de petróleos Ecopetrol.....	358
Capítulo Trece	365
Programación de tareas en mantenimiento.....	366
13.1. Introducción	366
13.2. La programación del Mantenimiento.....	366
13.2.1. Tiempo Programable Para Mantenimiento TPPM	366
13.2.2. Carga de trabajo programable o Carga de trabajo de mantenimiento CTM.....	367
13.2.3. Recursos	367
13.2.4. Balanceo de un Tablero de control	367
13.3. Ejercicio propuesto 1	376

Capítulo Catorce	377
Redes PERT/CPM aplicadas a Mantenimiento	378
14.1. Breve historia de los métodos de planificación, programación y control de proyectos con programas PERT y CPM.....	378
14.2. Definiciones generales.....	381
14.3. Procedimiento para realizar una programación PERT/CPM	383
14.4. Taller 1 propuesto.....	387
14.5. Taller 2 propuesto.....	387
 Capítulo Quince	 391
Planeación de la capacidad del departamento de mantenimiento	392
15.1. Trabajo represado o backlog.....	392
15.2. Planeación capacidad de Mantenimiento	397
15.3. Pronósticos para estimación numérica de la capacidad del departamento de mantenimiento	399
15.4. Estimación de la Capacidad del departamento de mantenimiento, utilizando un método aritmético	400
15.5. Preguntas de consulta o análisis y ejercicios	402
 Capítulo Dieciséis	 403
Gestión básica de un Almacén de repuestos.....	404
16.1. Generalidades de la gestión de un almacén.....	405
16.2. Otras funciones de los almacenes de repuestos de mantenimiento	407
16.3. Clasificación general de los Materiales de un Almacén.....	408
16.4. Estructura básica de un código de repuesto y asignación a centros contables	410
16.5. Rotación Inventarios R.....	413
16.6. Algunas estrategias para racionalizar inventarios.....	416
 Capítulo Diecisiete	 419
Subcontratación en Mantenimiento	420
17.1. ¿Cómo definir si se debe subcontratar o no?.....	420
17.2. Ventajas y desventajas de de subcontratar en mantenimiento	421
17.3. Algunos criterios para tener en cuenta en el contrato de servicios.....	423
17.4. Estimación básica de ahorro al utilizar el personal subcontratado	423
 Capítulo Dieciocho	 428
Presupuestos de Mantenimiento	429
18.1. Clasificación costos de mantenimiento.....	429
18.2. Rubros generales que se deben incluir en un presupuesto de Mantenimiento para una planta ya establecida.....	431
18.2.1. Presupuesto estratégico	431
18.2.2. Presupuesto programado	432

18.3. Técnicas para la elaboración de presupuestos	432
18.3.1. Presupuesto invariable o uniforme (<i>Técnica informal</i>)	433
18.3.2. Mano de obra más adquisiciones (<i>técnica informal</i>)	433
18.3.3. Factor fijo de las inversiones (<i>técnica adaptable</i>).....	434
18.3.4. Factor ajustable de las inversiones (<i>técnica adaptable</i>).....	434
18.3.5. Registro histórico ajustado (<i>técnica adaptable</i>).....	434
18.3.6. Presupuesto por tipo de costo (<i>técnica formal</i>).....	434
18.3.7. Presupuesto por sección (<i>técnica formal</i>)	434
18.3.8. Presupuesto por tipo de intervención	434
18.3.9. Presupuesto por costo incorporado al producto (<i>técnica formal</i>)	435
18.4. Principales rubros que deben tenerse en cuenta al elaborar un presupuesto de mantenimiento	436
18.5. Ejemplo de cálculo básico de un presupuesto de mantenimiento.....	437
18.5.1. Mantenimiento estratégico (<i>asociado a la ampliación de la planta</i>)	437
18.5.2. Mantenimiento sistemático	439
18.5.3. Estimación del presupuesto	440
18.6. Control de presupuesto	444
Capítulo Diecinueve	446
Introducción a la Gestión de activos.....	447
19.1. Definiciones básicas.....	450
19.2. ¿Cómo opera la Gestión de activos?	450
19.3. ¿Qué debe hacer Mantenimiento en el enfoque de la norma ISO 55000?.....	457
19.4. Ciclos PHVA.....	459
19.5. Ventajas de aplicar la gestión de activos.....	460
Capítulo Veinte	462
Auditoría de un departamento de Mantenimiento.....	493
20.1. Procedimiento general	493
20.1.1. Preparación de la auditoría.....	493
20.1.2. Visita de campo	464
20.1.3. Visitas al departamento de mantenimiento.....	465
20.1.4. Visita al departamento de Compras/división financiera	466
20.1.5. Recursos humanos	466
20.2. Informe de la auditoría de mantenimiento.....	467
20.2.1. Caso 1	467
20.2.2. Caso 2	468
20.2.3. Caso 3	468
ANEXO I. Layout o distribuciones en Planta de producción	479
A.1 Layout Jop shop o funcional o Bajo pedido	

A.2 Layout Flow shop o por producto	
A.3 Layout de producto Fijo o por proyecto	
A.4 Proceso continuo	
A.5 Layout de Sistemas de Manufactura Flexible	
ANEXO 2. Conceptos básicos de mecanización y automatización	485
B.1 Grados de Mecanización y Automatización	
B.2 Producción	
B.3 Productividad	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema general de entradas y salidas de una máquina	28
Figura 2 Sistema de control realimentado (<i>feedback</i>)	30
Figura 3 Representación de la dinámica de un Sistema de Mantenimiento	31
Figura 4 Esquema básico de un sistema separador de lodos	32
Figura 5 Vista parcial de un sistema real separador de lodos	33
Figura 6 (a) Vista del eje fracturado. (b) y detalle del sitio de fractura	34
Figura 7 (a) Vista de la sección fracturada. (b) Esfuerzo de Von Mises asociado	34
Figura 8 Comportamiento de los costos fijos, variables y totales de una empresa	40
Figura 9 Sistema de Mantenimiento	43
Figura 10 Ciclo gráfico del Mantenimiento Correctivo	44
Figura 11 Ciclo gráfico del Mantenimiento Programado	46
Figura 12 Ciclo gráfico básico del Mantenimiento Preventivo	47
Figura 13 Ciclo gráfico del Mantenimiento Predictivo	49
Figura 14 Esencia del Mantenimiento Basado en el Riesgo	53
Figura 15 Evolución histórica del Mantenimiento	54
Figura 16 Indebido direccionamiento de la función Mantenimiento	55
Figura 17 Escala de trabajo del mantenimiento en el TPM	55
Figura 18 Efectividad de los resultados en función del sistema o Tecnología de Mantenimiento empleada	56
Figura 19 Curva Costo remanente CR, Costo de mantenimiento Cm para hallar fecha recomendada de reemplazo del equipo	59
Figura 20 Curva de CR y CM versus vida económicamente útil, en función de la calidad del equipo	60
Figura 21 N° de empresas que aplican TPM ganadoras del premio a la excelencia (a nivel India)	64

Figura 22 Sectores económicos colombianos en 2014.....	69
Figura 23 Subsectores económicos colombianos en 2014.....	70
Figura 24 Ubicación del Departamento en una empresa pequeña 1.....	72
Figura 25 Ubicación del Depto. en una empresa pequeña 2.....	72
Figura 26 Ubicación del Departamento en una empresa pequeña 3.....	73
Figura 27 Ubicación del Departamento en una empresa mediana.....	73
Figura 28 Ubicación del Departamento en una empresa grande 1.....	73
Figura 29 Ubicación del Departamento en una empresa grande 2.....	74
Figura 30 Ubicación de Departamento en una empresa grande 3.....	74
Figura 31 Organigrama Depto. de Mantenimiento. Sistema formal centralizado.....	75
Figura 32 Organigrama Depto. de Mantenimiento. Sistema formal centralizado.....	76
Figura 33 Organigrama Depto. de Mtto. Sistema formal descentralizado.....	76
Figura 34 Ciclo gráfico del Mantenimiento Preventivo	82
Figura 35 Ciclo gráfico del Mantenimiento Preventivo. (a) Aspecto de carga de trabajo. (b) Aspecto económico.....	86
Figura 36 Directriz de codificación para una gran empresa.....	89
Figura 37 Tarjeta Maestra de Datos de banda transportadora.....	92
Figura 38 Depósito y mirilla del nivel de aceite	93
Figura 39 Compresor alternativo de acople directo.....	101
Figura 40 Vista panorámica de una Planta Hormigonera dosificadora	104
Figura 41 Distribución en Planta Flow Shop de una Planta Hormigonera dosificadora.....	105
Figura 42 Vista de planta Hormigonera dosificadora, según catálogo de partes.....	108
Figura 43 Orden de Trabajo emitida por un CMMS.....	113
Figura 44 Diagrama de flujo de administración de las Órdenes de trabajo	113
Figura 45 Efectividad de los resultados en función del sistema o Tecnología de Mantenimiento empleada.....	114
Figura 46 Sistema de Mantenimiento aplicados por las grandes empresas del área metropolitana Pereira – Dosquebradas	123
Figura 47 Sistema de Mantenimiento aplicados por las medianas empresas del área metropolitana Pereira – Dosquebradas	124
Figura 48 Respuesta a pregunta ¿Piensan cambiar de sistema de Mantenimiento? 124(a) Grandes empresas. (b) Medianas empresas.....	124
Figura 49 Respuesta a pregunta ¿Usan Software de Mantenimiento? (a) Grandes empresas. (b) Medianas empresas	125
Figura 50 Comportamiento esperado de una variable controlada	

en Mantenimiento Predictivo	125
Figura 51 Espectro de longitudes de onda visibles por el ojo humano	130
Figura 52 Estructura genérica de un bolómetro.....	131
Figura 53 Vista general de una cámara termográfica Wuhan Guide TP8S	133
Figura 54 Ejemplo de una imagen termográfica. (a) Imagen infrarroja. (b) Imagen visual.....	134
Figura 55 Ilustración del ensayo de tintas penetrantes.....	135
Figura 56 Resultado de prueba de tintas penetrantes a un troquel.....	136
Figura 57 Desalineación angular y espectro de vibración asociado	137
Figura 58 Esquema de una pieza balanceada y una desbalanceada.....	138
Figura 59 Excentricidad y espectro de vibración asociado	138
Figura 60 Resonancia y espectro de vibración asociado	139
Figura 61 Estado adecuado de coplanicidad de las patas.....	140
Figura 62 a) Claro u holgura causante de la pata suelta.	
b) Estructura deformada y esforzada, debido a la pata suelta	140
Figura 63 Bastidor de máquina/equipo con niveladores y empujadores	141
Figura 64 Equipo para medición y análisis de vibraciones UTP.....	143
Figura 65 Dinámica general de la medición y control de vibraciones	144
Figura 66 Comparación de los métodos de alineación.	145
Figura 67 Equipo de alineamiento por el método de los comparadores invertidos.....	146
Figura 68 Montaje en máquina balanceadora, para realizar balanceo en dos planos de un ventilador.....	147
Figura 69 Rangos de ultrasonido.....	148
Figura 70 Esquema básico de inspección por contacto.....	149
Figura 71 Esquema básico de inspección por inmersión.....	150
Figura 72 Aplicación del método pulso eco, por contacto directo	151
Figura 73 Aplicación del método onda continua, por contacto directo y por inmersión	151
Figura 74 Representación típica en B-San.....	152
Figura 75 Representación típica en C-San	153
Figura 76 Equipo Panametrics EPOCH XT, detector de discontinuidades por ultrasonido	154
Figura 77 Aplicación de ultrasonido para medición de espesores.....	155
Figura 78 Aplicación de ultrasonido para detección de defectos o discontinuidades.....	155
Figura 79 Aplicación de ultrasonido para evaluar calidad de la soldadura	156
Figura 80 Esquema típico de toma de muestra de aceite para análisis, en un motor de combustión interna	158
Figura 81 Principio de la industria 4.0.....	162

Figura 82 Tecnologías de la industria 4.0	163
Figura 83 Internet de las cosas IoT (<i>Internet of Things</i>)	164
Figura 85 Mantenimiento basado en la condición MBC	167
Figura 86 e-Maintenance en la nube con servicios web	168
Figura 87 Espectro de onda en velocidad.....	170
Figura 88 Termografía rodamientos lado polea y lado ventilador.....	170
Figura 89 Aplicación de software APEM para determinar ajuste del agujero.....	171
Figura 90 Aplicación de software APEM para determinar ajuste del eje.....	172
Figura 91 Relación variedad de partes versus volumen de producción, en función del sistema de manufactura.....	177
Figura 92 Los ocho pilares del TPM	179
Figura 93 Proceso de clasificación de aceites, grasas, filtros y herramientas.....	181
Figura 94 El antes y el después al aplicar Seiton a un taller de lubricación	182
Figura 95 Ejemplo de aplicación de Seiton para organizar repuestos	182
Figura 96 El antes y el después al aplicar Seiso a un taller de lubricación	138
Figura 97 Aplicación de Shitsuke en un taller de lubricación	184
Figura 98 Aplicación inicial y continuidad de limpieza	186
Figura 99 Contra-ejemplo de no eliminación de fuentes de contaminación y conservación de áreas accesibles	186
Figura 100 Ejemplo un estándar de mantenimiento en una industria alimenticia	187
Figura 101 Ejemplos de inspección autónoma	187
Figura 102 Ejemplos de uso de cuadros de sombra para la organización del lugar de trabajo.....	188
Figura 103 Ejemplo de implementación del mantenimiento autónomo	188
Figura 104 Ejemplo de implementación del mantenimiento autónomo	189
Figura 105 Ejemplo de comunicación visual de indicadores y metas en Mantenimiento autónomo	190
Figura 106 Cadena de razonamiento RCM	208
Figura 107 Sistema de producción de panela utilizando vapor.....	210
Figura 108 Diagrama de flujo de clasificación de equipos.....	213
Figura 109 Ejemplo de aplicación del diagrama de flujo a taladro TN.....	215
Figura 110 Intentos fallidos de contener el derrame de petróleo de Exxon Valdez.....	220
Figura 111 Limpieza de las orillas de Prince William Sound (Alaska - EEUU)	221
Figura 112 Esquema general de accidente en la planta Unión Carbide.....	222
Figura 113 Nube tóxica de MIC sobre Bhopal	223

Figura 114 Imagen aérea de la planta de Chernóbil, posterior a la explosión.....	224
Figura 115 Imagen del sarcófago que se culminó de construir en julio de 2019, para contener la radiación del reactor siniestrado.....	224
Figura 116 Metodología general para seguir en RBM.....	226
Figura 117 Diagrama de flujo para la Estimación del riesgo.....	226
Figura 118 Diagrama de flujo para la Evaluación del Riesgo.....	227
Figura 119 Diagrama de flujo para la Planeación del Mantenimiento.....	228
Figura 120 Esquema de ¿Cómo reducir el Riesgo a un nivel aceptable?.....	229
Figura 121 Equivalencias del SIL en varios estándares.....	230
Figura 122 Planta de proceso a controlar.....	231
Figura 123 Esquema general sistema de Control realimentado o feedback.....	232
Figura 124 Sistema de control feedback para el tanque de la Figura 123.....	232
Figura 125 Sistema de control feedback real para el tanque de la Figura 85.....	233
Figura 126 Planta de proceso protegida por un SIS.....	234
Figura 127 Niveles de protección antes que ocurra la catástrofe.....	235
Figura 128 Sistema de mantenimiento empleados por las grandes empresas Pereira - Dosquebradas, al año 2018.....	243
Figura 129 Sistema de mantenimiento empleados por las grandes empresas Pereira - Dosquebradas, al año 2018.....	243
Figura 130 Evaluación del riesgo para el sistema de instrumentación y control de la tabla 31.....	245
Figura 131 Algunos ejemplos de señalizaciones de parada y prohibición.....	250
Figura 132 Algunos ejemplos de señalizaciones de prevención.....	250
Figura 133 Algunos ejemplos de señalización de condición segura.....	251
Figura 134 Algunos ejemplos de señalización de obligación.....	252
Figura 135 Riesgos al hacer uso de un centro de mecanizado Haas VF-2.....	252
Figura 136 Ejemplo de Permiso de trabajo en alturas.....	258
Figura 137 Fragmento de lista de chequeo.....	259
Figura 138 Ejemplo de demarcación correcta de la zona de peligro.....	260
Figura 139 Candado de bloqueo.....	260
Figura 140 (a) Tarjeta de advertencia o bloqueo.	
(b) Candado de bloqueo y tarjeta de advertencia.....	261
Figura 141 Porta-candados de seguridad.....	261
Figura 142 Tasa de accidentalidad TA para Colombia años 2017.....	263
Figura 143 Relación entre los actores en el proceso de gestión de RESPEL.....	268
Figura 144 Almacenamiento inadecuado de productos RESPEL.....	269

Figura 145 Bodega comercial para almacenamiento de residuos RESPEL	270
Figura 146 Esquema general de un sistema mecatrónico	269
Figura 147 Curvas de Costo Remanente CR contra Costo de Mantenimiento	270
CM en función de la tecnología de fabricación del equipo	275
Figura 148 Sistema Motor - reductor - Resistencia mecánica	278
Figura 149 Acoples no estandarizados y excesivamente rígidos	279
Figura 150 Agujeros mal trazados.....	280
Figura 151 Agujeros mal trazados y elaborados.....	281
Figura 152 Esquema explicativo básico el origen de la fricción.....	286
Figura 153 Esquema explicativo del Desgaste adhesivo.....	287
Figura 154 Esquema explicativo del Desgaste abrasivo.....	287
Figura 155 Desgaste adhesivo y abrasivo combinados.....	288
Figura 156 Curva de Stribeck	290
Figura 157 Formulación general de los lubricantes minerales, semi-sintéticos y sintéticos	293
Figura 158 Curva Viscosidad versus temperatura para (2) IV diferentes.....	294
Figura 159 Ahorro de combustible de un aceite sintético frente a uno semisintético	294
Figura 160 Presentación de aceites de buena calidad y procedencia.....	300
Figura 161 Comparación de viscosidades de aceites, de acuerdo a varias normas y aplicaciones	301
Figura 162 Sistema de lubricación a pérdida total por goteo	310
Figura 163 Comportamiento en el tiempo de los sistemas de lubricación tradicional normal.....	311
Figura 164 Comportamiento en el tiempo de un sistema de lubricación centralizado	311
Figura 165 Sistema de lubricación a pérdida total por niebla	313
Figura 166 Sistema de lubricación centralizado aplicado en torno CNC.....	314
Figura 167 Algunas aplicaciones típicas de lubricación por salpique	316
Figura 168 Curva variación de temperatura con aceite ISO 68.....	321
Figura 169 Curva variación de temperatura con aceite ISO 37.....	322
Figura 170 Termografías de la bomba con aceite ISO 68 e ISO 37.....	322
Figura 171 Termografías de la bomba con aceite ISO 68 e ISO 37.....	323
Figura 172 Elección de un Modelo de Mantenimiento	330
Figura 173 Diagrama de Pareto para fallas en salas de calderas	352
Figura 174 Diagrama de Ishikawa o Espina de pescado	354
Figura 175 Unidad de bombeo típica utilizada para extraer petróleo.....	358
Figura 176 Unidades que intervienen en el sistema de transmisiones por polea y correa	359
Figura 177 Diagrama de Ishikawa o Causa - Efecto para fractura de ejes.....	360
Figura 178 Diagrama esquemático de reparación ejes motores eléctricos	361

Figura 179 Comportamiento de algunos patrones de Falla.....	367
Figura 180 Comportamiento ideal de la Carga de Trabajo de Mantenimiento CTM versus tiempo transcurrido	367
Figura 181 Ejemplo de red PERTC/CPM básica.....	381
Figura 182 Tiempos característicos de cada actividad	381
Figura 183 Pantallazo de inicio de Microsoft Project.....	385
Figura 184 Información del ejemplo XX y diagrama Gantt respectivo	385
Figura 185 Ruta crítica del ejemplo	386
Figura 186 Reporte gerencial de la ruta crítica del ejemplo	386
Figura 187 Vista general de la dragalina	387
Figura 188 Plano de conjunto del malacate a reparar.....	388
Figura 189 Analogía del riachuelo. (a) Fallas evidentes y ocultas. (b) Fallas ocultas que se han hecho evidentes.3	92
Figura 190 Diagrama de flujo Proceso de retiro producto almacén.....	403
Figura 191 Rodamiento - encoder SKF 6202 VK2415	408
Figura 192 Esencia del Core Bussiness Analysis	419
Figura 193 Curva de costo total mínimo.....	432
Figura 194 Principales secciones de la norma ISO 55000.....	450
Figura 195 Estructura general del estándar BSI PAS 55.....	452
Figura 196 Variables para balancear en la Gestión de activos.....	452
Figura 197 Expectativa económica y financiera de un proyecto.....	453
Figura 198 Expectativa económica y financiera de un proyecto.....	454
Figura 199 Relación entre la gestión de activos y el retorno sobre el capital empleado ROCE.....	455
Figura 200 Relación entre la gestión de activos y el retorno sobre el capital empleado ROCE.....	455
Figura 201 Evolución de los conceptos de mantenimiento en Gestión de activos	457
Figura 202 Estrategia de los sistemas balanceados de indicadores SBI.....	458
Figura 203 Proceso de mejoras focalizadas en mantenimiento	459

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Estructura de costos de una microempresa (en COP).....	41
Tabla 2 Actividades básicas del Mantenimiento.....	42
Tabla 3 Ventajas y desventajas del Mantenimiento Correctivo	45
Tabla 4 Ventajas y desventajas del Mantenimiento Programado	46
Tabla 5 Ventajas y desventajas del Mantenimiento Preventivo	48

Tabla 6 Ventajas y desventajas del Mantenimiento Predictivo	49
Tabla 7 Resultados condensados de la entrega de premios 2018 Award for TPM Excellence, category A, outside Japan	65
Tabla 8 Resultados condensados de la entrega de premios 2018 Award for Excellence in Consistente TPM Commitment outside Japan.....	66
Tabla 9 Algunas estadísticas de empresas colombianas, de acuerdo con su tamaño.....	71
Tabla 10 Actividades generales desarrolladas por un Ingeniero/Tecnólogo de Mantenimiento	78
Tabla 11 Modelo básico de Historial de Mantenimiento.....	90
Tabla 12 Listado de requerimientos para compresor de pistón.....	94
Tabla 13 Tablero de control diario.....	96
Tabla 14 Tablero de control anual.....	97
Tabla 15 Fragmento de Tablero de control por horas reales trabajadas	98
Tabla 16 Formato básico para control de Tareas de Mantenimiento rutinario	107
Tabla 17 Formato básico para control ejecución de OT.....	110
Tabla 18 Fuentes de vibración en maquinaria y estructuras.....	137
Tabla 19 Criterio provisional de vibración para un grupo específico de máquinas según la norma ISO 10816 – 1995	142
Tabla 20 Modelos para balanceo.....	147
Tabla 21 Valores permisibles máximos de viscosidad, agua, metales y otros	160
Tabla 22 Pruebas realizadas al motor	169
Tabla 23 Fases y etapas para la implementación del TPM en una organización.....	191
Tabla 24 Patrones de Falla de componentes de la industria aeronáutica de EE.UU.	199
Tabla 25 Categorías de Gravedad o severidad	201
Tabla 26 Categorías de Probabilidad de ocurrencia.....	202
Tabla 27 Valores recomendados para la evaluación del NPR	204
Tabla 28 Resumen inventario inicial máquinas.....	211
Tabla 29 Matriz de riesgo.....	212
Tabla 30 Ejemplo de aplicación matriz de riesgo a Taladro neumático TN.....	214
Tabla 31 Resultados de clasificación.....	216
Tabla 32 Valores estandarizados de SIL y características asociadas.....	229
Tabla 33 Análisis de riesgos, modos y efectos de falla	230
Tabla 34 Tasa de accidentalidad por sector económico - Colombia 2017	265
Tabla 35 Errores comunes en el uso de elementos estandarizados e intercambiables.....	283
Tabla 36 Evolución en el tiempo de los aceites para motor a gasolina	297
Tabla 37 Evolución en el tiempo de los aceites para motor a diesel.....	298

Tabla 38 Grados SAE de viscosidad para aceites de motor	299
Tabla 39 Clasificación API para transmisiones automotrices.....	300
Tabla 40 Viscosidades cinemáticas para diferentes grados ISO	301
Tabla 41 Consistencias normalizadas para grasas	304
Tabla 42 Tipos de jabón o espesante, punto de goteo y otras propiedades asociadas.....	305
Tabla 43 Tabla de compatibilidades para tener en cuenta al mezclar grasas de diferente jabón.....	306
Tabla 44 Tabla de propiedades de líquidos de frenos comerciales	307
Tabla 45 Consecuencias de lubricar en exceso y en defecto.....	308
Tabla 46 Campo de aplicación de los Métodos de lubricación a pérdida total	319
Tabla 47 Campo de aplicación de los Métodos de lubricación circulatorios	325
Tabla 48 Panorama de los Modelos de Mantenimiento.....	327
Tabla 49 Modelos de Mantenimiento y sistemas de mantenimiento	333
Tabla 50 Indicadores de Eficacia del Mantenimiento	339
Tabla 51 Indicadores de administración del Mantenimiento	340
Tabla 52 Indicadores de Costos de Mantenimiento	342
Tabla 53 Cuadro para control de partes de desgaste	348
Tabla 54 Cuadro para control de consumo de combustibles	349
Tabla 55 Resultado seguimiento fallas en calderas.....	352
Tabla 56 Categorización y cálculo de porcentajes acumulativos	353
Tabla 57 Tipos de fallas y frecuencias para refrigeradores	358
Tabla 58 Tablero de control anual.....	369
Tabla 59 Holguras y excesos iniciales de la Tabla 56.....	370
Tabla 60 Tablero de control anual balanceado.....	372
Tabla 61 Holguras y excesos finales, a partir de la Tabla 56.....	370
Tabla 62 Desarrollo de pasos c, d y e, del Balanceo real.....	372
Tabla 63 Proceso de balanceo de las Tareas de lubricación.....	373
Tabla 64 CTM final para las tareas de lubricación	373
Tabla 65 Proceso de balanceo de las Tareas de Electricidad	374
Tabla 66 CTM final para las tareas de Electricidad.....	374
Tabla 67 Proceso de balanceo de las Tareas de Mecánica.....	374
Tabla 68 CTM final para las tareas de Mecánica	375
Tabla 69 Tabla secuencial para Proyecto “Diseño de un producto nuevo”	384
Tabla 70 Estructura tabla de Cómputo de tiempos	384
Tabla 71 Relación de partes de desgaste y recambio del malacate	388
Tabla 72 Tabla secuencial para overhaul de malacate	389

Tabla 73 Estatus de Backlog.....393

Tabla 74 Clase en el Backlog con base a la antigüedad.....393

Tabla 75 Tiempos de permanencia o espera de las OT en función de la prioridad o del tipo de trabajo.....394

Tabla 76 % CDM versus Costo operativo total, según el subsector económico.....398

Tabla 77 Clasificación de los repuestos por rotación409

Tabla 78 Códigos contables de material de mantenimiento409

Tabla 79 Tabla de codificación de repuestos410

Tabla 80 Costo preliminar mensual (para la empresa) de un técnico especializado en refrigeración.....423

Tabla 81 Cálculo de costo del tiempo extras del técnico en refrigeración424

Tabla 82 Cálculo de adicionales para técnico en refrigeración424

Tabla 83 Cálculo de adicionales para técnico en refrigeración426

Tabla 84 Estimación de consumo de repuestos de la maquinaria nueva438

Tabla 85 Estimación de consumo de repuestos de la maquinaria usada.....439

Tabla 86 Presupuesto de Mantenimiento años 2019, 2020, 2021443

Tabla 87 Referencia numérica de beneficios de la aplicación de la Gestión de activos456

Prólogo

Este libro texto tiene como propósito iniciar a estudiantes de Ingeniería y Tecnología en la teoría y práctica básica de la administración del Mantenimiento industrial, campo sumamente importante en las organizaciones productivas modernas y donde se ocupan, en Colombia, la mayoría de los egresados de Ingeniería y afines.

Este libro es la continuación natural del trabajo iniciado hace un tiempo con el texto *Fundamentos de Mantenimiento Industrial*, en el cual se plantearon las bases conceptuales del quehacer de un ingeniero o tecnólogo recién egresado. En el presente libro se hace énfasis en la administración del mantenimiento industrial, pensando en noveles ingenieros o tecnólogos.

En la forma que fue concebido y redactado el libro es susceptible de ser leído y comprendido no solo por estudiantes universitarios, sino también por otros profesionales y personas ajenas al ámbito académico directo, pero con interés en el amplio mundo del Mantenimiento.

Características de la obra

Al inicio de la obra se presenta un panorama amplio del Mantenimiento, para que el lector pueda dimensionar su importancia.

La obra consta de veinte capítulos, dedicándose los capítulos 1 y 2, a explicar la esencia del Mantenimiento: nociones y fundamentos básicos, pasando por un breve recuento histórico de la evolución del Mantenimiento y las efectividades alcanzadas por cada metodología, la composición genérica de un departamento de mantenimiento y su ubicación en las empresas.

En los capítulos 3 a 7 se describen las diferentes metodologías o sistemas de mantenimiento, iniciando con el primitivo Correctivo o “reparar” hasta llegar a las metodologías más modernas como el *Basado en el Riesgo RBM*, describiendo además la esencia del mantenimiento para la industria 4.0

En los capítulos 8 a 10 se describen aspectos de naturaleza ejecutiva y práctica del mantenimiento, su relación con la seguridad industrial y la salud ocupacional, aspectos relacionados con la mantenibilidad y fundamentos de lubricación. En el capítulo 11 con los *Modelos o políticas de Mantenimiento* se da una mirada integradora, a los temas previos, por intermedio de los.

A partir del capítulo 12 se tratan temas eminentemente administrativos: indicadores, programación, redes PERT-CPM, planeación de la capacidad de mantenimiento, el almacén de mantenimiento, subcontratación, elaboración de presupuestos, introducción a la gestión de activos y auditoría de un departamento. Todos estos temas son importantes y necesarios de comprender por parte de un novel profesional que se desempeñe en departamentos de mantenimiento.

En la medida de las posibilidades, a lo largo de la obra se hace énfasis en todo momento en que mantenimiento es la interacción de tareas técnico-administrativas, ligadas a presupuestos y costos.

En varios capítulos se han presentado ejemplos con datos numéricos, lo más realistas posibles y hasta donde ha sido posible, se ha tratado de dar una mirada holística entre Manufactura, Mantenimiento y Costos.

Algunos temas se presentan concatenados con la realidad local y de Colombia y en algunos casos con realidades foráneas.

Para muchos de los temas tratados se proponen consultas, talleres o ejercicios de aplicación. Para algunos de los temas tratados se indica la forma de sistematizar su operación con el uso de software comercial (Hoja electrónica Excel, Microsoft Project, etc.).

En la forma como ha sido concebido el libro, sirve de respaldo para un curso clásico de mantenimiento industrial de pregrado y también servirá para soportar un curso de Administración básica de mantenimiento industrial

El autor:

Correo electrónico: cmontilla@utp.edu.co

Sitio web <http://cmontilla.jimdo.com/>

Glosario

<i>Aggregate bin</i>	Depósito de agregados
<i>Backlog</i>	Atraso. Trabajo represado
<i>Cement batcher</i>	Dosificador de cemento
<i>Conveyor</i>	Transportador
<i>Core Business analysis</i>	Análisis del núcleo del negocio
CPM	<i>Critical Path Method</i> . Método de la ruta crítica
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management System</i>
<i>Downsizing</i>	Adelgazamiento o reducción de la estructura de las organizaciones
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
<i>Flow shop</i>	Producción por proceso o por línea de flujo
FMEA	<i>Failure Mode and effect Analysis</i> . Análisis de modo y efecto de falla
FTA	<i>Failure Tree Analysis</i> o Árbol de análisis de fallas
<i>Good will</i>	Reputación o buen nombre de una empresa
ISA	<i>Instrument Society of America</i>
JIT	<i>Just In Time</i>
JIPM	<i>Japan Institute of Plant Maintenance</i>
<i>Lean manufacturing</i>	Manufactura esbelta
<i>Know-how</i>	Saber hacer, experticia, conocimiento + experiencia
<i>Mixer</i>	Mezclador.
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i> . Tiempo promedio entre fallas
OT	Orden de trabajo
OTs	Orden de trabajo estándar
OTns	Orden de trabajo no estándar
<i>Outsourcing</i>	Externalización o tendencia a efectuar trabajos, contratados externamente a la empresa.
<i>Overhaul</i>	Revisión y reparación mayor a una máquina o equipo.
PERT/CPM	<i>Project Evaluation and Review Techniques</i> o Técnicas de evaluación y revisión de proyectos.
RBM	<i>Risk Based Maintenance</i> . Mantenimiento basado en el riesgo
RCFA	<i>Root Centered Failure Analysis</i> o Análisis de la causa raíz de la falla
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i> . Mantenimiento centrado en la confiabilidad
<i>Reliability</i>	Confiabilidad o Fiabilidad
RMS	Root Mean Square
<i>Screw conveyor</i>	Transportador de tornillo
<i>Setup</i>	Preparación o alistamiento de una labor
SIL	<i>Safety Integrity Level</i>
SIS	<i>Security Instrumented System</i>
<i>Strain gauge</i>	Deformómetro o medidor de fuerza por deformación.
<i>Stock</i>	Inventario
TBF	<i>Time Between Failure</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>

CAPÍTULO UNO

Nociones introductorias

1.1. Introducción

El Mantenimiento es una disciplina que soporta constantemente el desenvolvimiento de los sistemas productivos modernos. Su aplicación mínima comienza con tareas tan sencillas como orden, aseo, lubricación básica y ajustes menores, pasando paulatinamente a niveles más avanzados como rutas de inspección y lubricación, mediciones puntuales con instrumentos especializados y mediciones totales u *online*, con sistemas de adquisición de datos, todo ello acompañado de procesos técnico-administrativos, soportados cada vez más por las tecnologías de la informática y las telecomunicaciones TIC.

1.2. Definiciones básicas

Las definiciones que se presentan a continuación pretenden dar un referente común a lo largo del presente libro, y dependiendo del contexto o autor, pueden darse a diferentes interpretaciones. Es necesario tener en cuenta que las definiciones han sido presentadas en los contextos de producción o fabricación y del mantenimiento. La pluriculturalidad conlleva a que en los ámbitos no académicos se utilice de manera indistinta (y a veces errónea) un término u otro.

1.2.1. Máquina y equipo

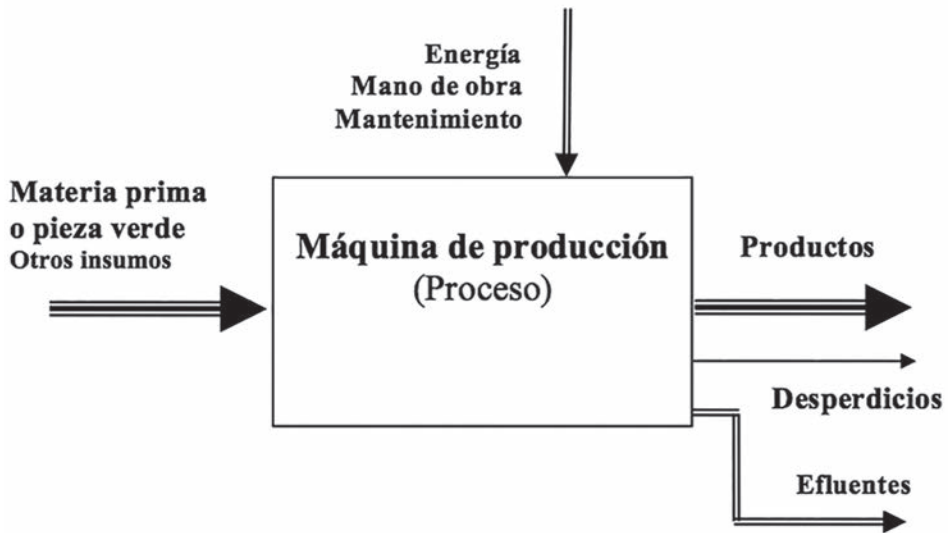
Máquina. Conjunto de elementos móviles y fijos, cuyo funcionamiento posibilita aprovechar, dirigir, regular o transformar energía, o realizar un trabajo con un fin determinado. Regularmente, en el ámbito industrial, se asume que una máquina entrega algún tipo de producto tangible, es decir, transforma una materia prima en una pieza verde, o una pieza verde en un producto semi-terminado o terminado. Ejemplos: tornos, fresadoras, máquina de corte con láser, etc.

Equipo. Colección de utensilios, instrumentos y aparatos especiales para un fin determinado (por ejemplo, “equipo quirúrgico”, “equipo de salvamento”, etc.). También recibe el nombre de *equipo* cada uno de los elementos de dicho conjunto. Regularmente, en el ámbito industrial, se asume que un equipo presta un servicio o modifica las propiedades de la materia prima/pieza verde/producto semi o terminado que transite por él. Ejemplos: equipos de ventilación, acondicionadores de aire, de cómputo, para temple de piezas, etc.

Para una empresa de producción, una máquina o equipo puede ser esquematizada acorde a lo mostrado en la Figura 1. Mediante la adición de energía, mano de obra,

repuestos, mantenimiento y otros insumos, la materia prima se transforma en productos y regularmente quedan unos desperdicios (retales). Los efluentes son diferentes de los desperdicios, generalmente se constituyen en contaminantes, como humos de combustión, gases, vapores, aguas calientes o con químicos, ruido, etc.

Figura 1. Esquema general de entradas y salidas de una máquina



1.2.2. Fallas y estados asociados

- **Falla.** Toda condición que afecta la operación normal de una máquina/equipo.
- **Falla funcional.** Tipo de falla que impide que una máquina/equipo. continúe en operación (ocurre avería mayor).
- **Falla potencial.** Tipo de falla que no inhabilita a la máquina/equipo para que opere, pero en determinado momento propicia las condiciones para que ocurra una varada. En otras palabras, una falla potencial es una falla funcional en gestación.
- **Estado teórico o nominal de una máquina/equipo.** Aquella condición operativa y de funcionamiento que debe poseer una máquina/equipo cuando sale de fábrica; el *estado teórico* debe ser redefinido en la medida que el equipo haya trabajado x cantidad de tiempo, debido a que sufre una degradación normal que aleja su nivel de rendimiento del inicial, en este caso se habla de *estado nominal*.

- **Estado real de una máquina/equipo.** Aquel estado que exhibe la máquina/equipo en cualquier momento de su operación. El estado real puede coincidir o no, con los *estados teórico y nominal*.

1.2.3 Mantenimiento

Definición 1. “Es mantener un ítem de producción en condiciones óptimas o hacer que recupere esa característica. Disciplina inherente a la producción y no se puede concebir aparte de ella” [1].

Definición 2. Parte de la Ingeniería que con su acción ayuda a la conservación de los elementos de una empresa, sea cual fuere, además haciendo mínimas las fallas inesperadas con lo cual se obtendrá más economía, seguridad y eficiencia dentro de la empresa.

Definición 3. “Conjunto de recursos físicos (tierra, capital, equipos), recursos humanos, tecnología e información, que acoplados buscan mejorar la eficiencia del sistema de producción disminuyendo los paros, aumentando la confiabilidad del equipo y garantizando la seguridad y un nivel de costos rentable; todo ello dentro del marco del desarrollo propio de la empresa y del país” [2].

Definición 4. “Conjunto de actividades (planificadas y coordinadas) que propende a mantener los equipos (de diversa índole), en una condición operativa, lo más cercana posible de su estado teórico o nominal, con el mínimo de inversión (económica, tiempo, insumos), de manera segura para el personal y el medio ambiente, apoyando de manera positiva el cumplimiento de las metas de una organización” [3].

De las definiciones anteriores, se pueden puntualizar varios asuntos:

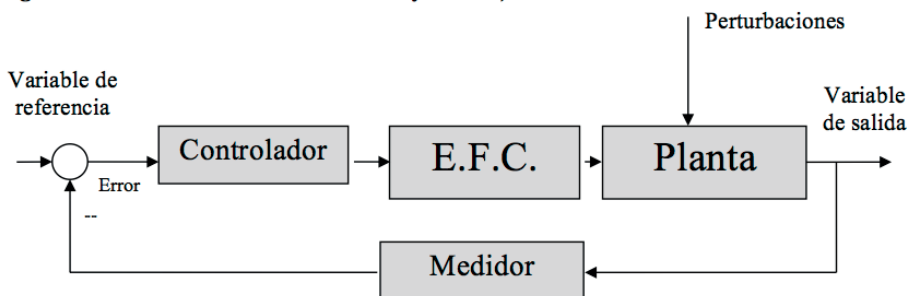
- El Mantenimiento no es una actividad *estática* que se planee y se ejecute de manera indefinida, por el contrario, es una actividad dinámica que permanentemente amerita revisiones, cambios y mejoras.
- El Mantenimiento es inherente a la producción.
- Es transversal a todas las dependencias de una compañía.

La dinámica del Mantenimiento puede ser representada de manera análoga a la forma como opera un lazo de control realimentado (*feedback*), tal como se muestra en las Figuras 2 y 3.

La Figura 2 recuerda que en un sistema de control realimentado se plantea para mantener *en el tiempo* una variable de operación o *variable de salida* de una *planta*, dentro de un margen considerado como “aceptable”. Para tal fin un *medidor o sensor* constantemente captura el valor de la *variable de operación* y la envía a distancia a un *elemento comparador*. El *comparador* realiza una resta entre un valor fijado como aceptable, llamado *variable de referencia* o *set point* y el valor actual de la *variable de salida*, dicha diferencia recibe el nombre de *error*. La señal de *error* es tomada por un *controlador*, el cual genera una *acción correctora* y la envía a un *elemento final de control E.F.C. o actuador* (válvula, motor, cilindro, etc.), el cual adiciona o retira energía de la *planta* con el fin de reducir el error. Sobre la planta real actúan las inevitables entradas indeseables o *perturbaciones*, cuyo efecto debe ser minimizado por el sistema de control.

Figura 2. Sistema de control realimentado (*feedback*)

Figura 2. Sistema de control realimentado (*feedback*)



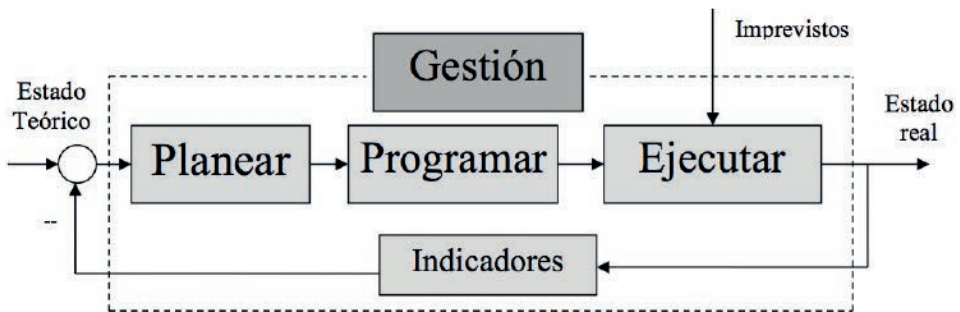
La Figura 3 ilustra cómo las consideraciones anteriores se pueden hacer extensivas (en una relación uno a uno) a la operación de un departamento de mantenimiento de una empresa, cuyo objetivo fundamental es que el *estado real* de un equipo/proceso *en el tiempo* se asemeje a una condición *nominal o teórica* (regularmente fijada por el fabricante o proveedor). Para tal fin se dispone de una infraestructura en la cual, vía elaboración de *reportes e indicadores* y/o de instrumentación, se determina el *estado real* del equipo, el cual se compara con la *condición nominal o teórica* y como resultado de dicha comparación regularmente aparecen *diferencias*. Con base en las *diferencias* se deben llevar cabo labores de *planeación* (estrategias, presupuestos, personal, etc.), las cuales se deben llevar al día a día, aplicando *programación y ejecución* de actividades (limpieza, orden, lubricación, cambios, etc.), acompañadas de sus respectivos imprevistos.

En la medida que pasa el tiempo de uso del equipo/proceso, al margen de la consecuente obsolescencia, inevitablemente, se introducirán desajustes y desgastes

en él, con lo cual los consumos de energéticos, las velocidades de operación, la calidad de la producción y su estado operativo (ruidos, humos, gases, etc.) desmejorarán, mientras que la cantidad y profundidad de las intervenciones de mantenimiento aumentarán, haciendo necesario replantear el estado nominal y las tareas de planeación, programación y ejecución subsecuentes; a estas situaciones hace alusión el comportamiento *dinámico* del mantenimiento (similar al del sistema de control *feedback*).

En Mantenimiento las tareas de Planeación, Programación, ejecución, elaboración de indicadores y comparación son actividades técnico-administrativas que requieren de una permanente gestión para que los resultados sean satisfactorios y sostenibles en el tiempo.

Figura 3. Representación de la dinámica de un Sistema de Mantenimiento



El Mantenimiento en una disciplina transversal al quehacer humano y su aplicación es muy amplia, tocando campos tan diversos como:

- Edificaciones
- Vías terrestres de comunicación
- Electrodomésticos
- Instalaciones eléctricas domiciliarias e industriales
- Maquinaria industrial
- Vehículos de la industria del transporte terrestre de carga y pasajeros
- Maquinaria agrícola
- Equipo de minería y de transporte fuera de carretera
- Agroindustria
- Equipos de informática y telecomunicaciones

- Navegación marítima, aérea y espacial
- Todo tipo de máquinas y artefactos militares

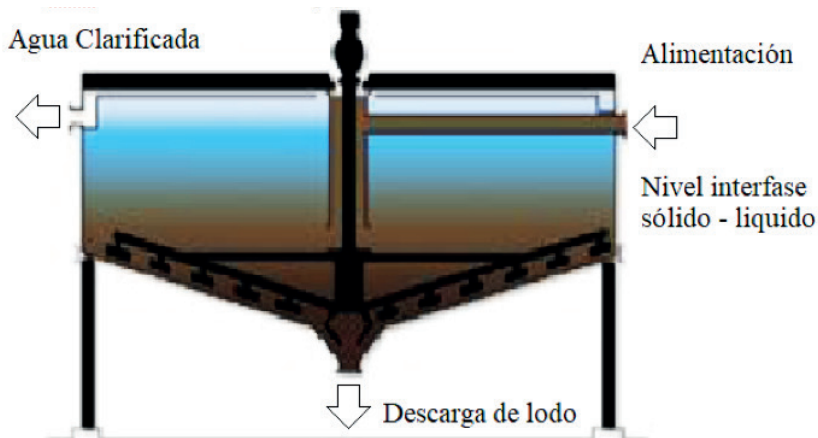
1.2.4 Empresa

Actividad organizada, apoyada por recursos físicos, humanos y financieros, con el fin de fabricar productos, proveer servicios y generar utilidades para los accionistas.

1.2.5 Ejemplo para aclarar algunas definiciones básicas

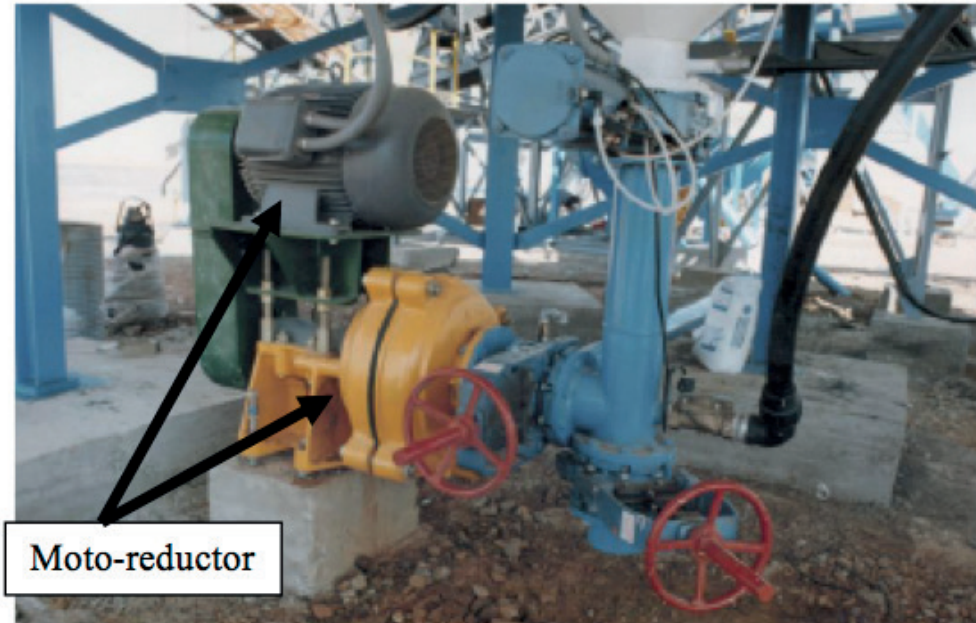
Situación: Sistema (equipo) separador de lodos de una empresa de tratamiento de agua. Un sistema separador de lodos (Figura 4) regularmente consta de los siguientes subsistemas: estructura, tanque, agitador de paletas accionado por un moto-reductor, ducto de entrada de sólido-líquido, ductos de salida de agua clarificada y de lodos captados, elementos eléctricos de protección y maniobra. La captación de lodo se propicia con el uso de cal.

Figura 4. Esquema básico de un sistema separador de lodos
Tomado de Eral S. A. Clarificadores [4]



La Figura 5 ilustra la disposición de un sistema separador real. El sistema en estudio comenzó a presentar ruido y vibraciones anormales durante la operación, los cuales poco a poco se fueron acrecentando, hasta que un buen día el agitador dejó de funcionar.

Figura 5. Vista parcial de un sistema real separador de lodos Tomado de Eral S. A. Clarificadores [4]



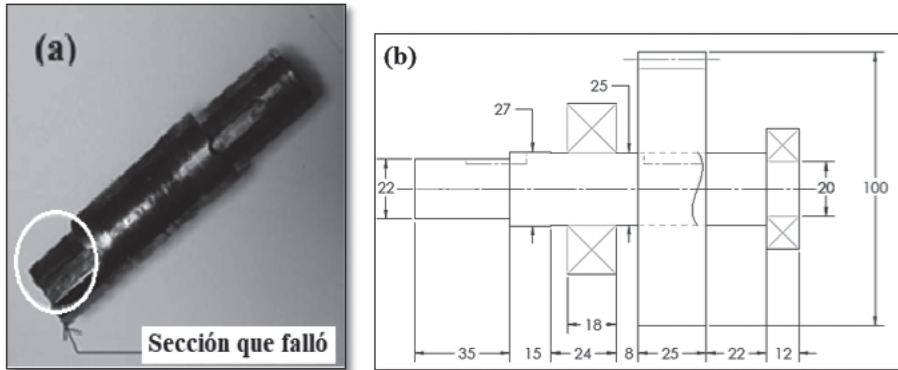
Con la aplicación de una metodología sencilla de detección de fallas, se excluyeron como causantes del problema, los subsistemas eléctricos de protección y maniobra, el motor y el agitador, hasta que se llegó a la causa-raíz del problema, consistente en que el eje principal del reductor se fracturó (Figura 6).

Análisis básico:

Falla potencial. Vibración y ruido anormales. Afectación paulatina de una condición.

Falla funcional. Rotura del eje del reductor. Pérdida de la función productiva del equipo separador de lodo, en otras palabras, *avería mayor*.

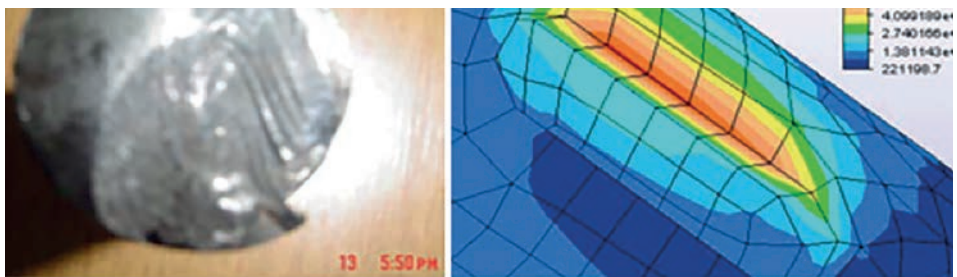
Figura 6. (a) Vista del eje fracturado. (b) y detalle del sitio de fractura Tomado de [5]



Análisis de Ingeniería

Para el estudio de caso particular se realizaron una serie de ensayos y análisis, los cuales determinaron que el material del eje correspondía a un material SAE 1045. Adicionalmente se realizaron análisis de micro-estructura y cálculo de esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad, con la asistencia de un software de elementos finitos o *FEA* (*Finite Element Analysis*). La Figura 7 ilustra la región donde ocurrió la fractura y el esfuerzo de *Von Mises* arrojado por el *FEA*.

Figura 7. (a) Vista de la sección fracturada. (b) Esfuerzo de Von Mises asociado. Tomado de [5]



Conclusión: Motivo de la falla. Originalmente, el eje poseía un cuñero, el cual se deformó de manera sustancial, por lo que los encargados decidieron (posiblemente por la premura de tiempo) hacer el típico “desvare”, consistente en elaborar otro cuñero ubicado a 45° del original. Desde el punto de vista funcional la reparación

funcionó, pero se generó desbalanceo (el cuñero original quedó vacío) y se generó otro concentrador de esfuerzos por el cuñero nuevo; el análisis realizado con el CAE mostró que el factor de seguridad hallado era muy bajo para el estado de sollicitación (de 1,1 a 1,5), por lo que finalmente el material se fatigó y se rompió.

Comentario adicional. En el argot popular del mantenimiento hay un adagio que reza “*No hay mejor definitivo que un buen provisional*”. En el día a día de la práctica del Mantenimiento hay ocasiones en que es necesario “apagar el incendio” de manera rápida y efectiva, pero hay que tener cuidado con ello, porque cada *provisional* que se deja es un *enemigo que se vuelve contra uno, en el momento más inoportuno*, por lo tanto, el mensaje es evitar realizar *reparaciones provisionales*.

1.3 Objetivos básicos del mantenimiento

Una de las conclusiones del análisis de las definiciones tratadas en el numeral 1.2.3 dice “el Mantenimiento es inherente a la producción”, por lo que se considera pertinente recordar las entradas y salidas de una máquina y la definición de empresa, descritas en los *numerales 1.2.1 y 1.2.4*, respectivamente. Con base en dichos planteamientos, debe haber claridad en que Mantenimiento es una disciplina que entra a apoyar el cumplimiento de los logros de una empresa, mediante el cumplimiento de los objetivos propuestos a continuación.

1.3.1. Reducir las fallas funcionales (paradas imprevistas) de los equipos, y los costos asociados a ellas

Las máquinas y equipos están diseñados para proveer una rata o tasa de producción (m^3/h , ton/h, piezas/h, etc.). La producción puede ser discreta, continua o una combinación de ellas. Discreta, cuando se producen lotes de piezas o partes de piezas (ejemplo, ensambladora de motocicletas, inyectora de plástico). Continua, cuando la producción se materializa en flujo de masa o flujo volumétrico (ejemplo la producción en barriles día de una refinería de petróleo, los $m^3/día$ tratados en una planta de tratamiento de agua). Los efectos y consecuencias de la ocurrencia de una falla funcional dependen de la distribución de planta o *layout* de planta (ver Anexo 1).

Algunos de los efectos y consecuencias que acarrea una falla funcional son:

- Detención de la producción
- Pérdidas de materia prima y producto en proceso
- Defectos de calidad

- Riesgo de accidente laboral
- Riesgo de daño al medio ambiente
- Incremento de gastos por repuestos y mano de obra de mantenimiento correctivo de emergencia (que regularmente son mayores si la reparación se hubiese hecho a tiempo)
- Incumplimiento a los clientes
- Lucro cesante durante el tiempo que demora la reparación de la Planta
- Incremento del consumo de energía en el re-arranque una vez terminada la reparación
- Horas extras de personal de producción para culminar los pedidos
- Pérdida de productividad por desmotivación del personal
- Afectación al buen nombre (*goodwill*) de la empres

1.3.2 Asegurar unos costos operativos razonables de los equipos, y procurar mejoras de ellos

Los *costos de operación CO* (fórmula 1) son aquellos en que se incurre cuando se hace uso de la máquina/equipo para producir un bien o servicio.

$$CO = C_{co} + C_{lu} + CM + C_{rm} + C_{pd} \quad (1)$$

Donde

CO es el costo de operación de una máquina/equipo;

C_{co} es el costo de los combustibles necesarios para la operación de la máquina (electricidad, gas, gasolina, ACPM, bagazo de caña, etc.);

C_{lu} es el costo asociado a la lubricación (aceites, grasas y filtros);

CM es el costo de las labores rutinarias de Mantenimiento. Incluye mano de obra, repuestos (partes de recambio), herramientas y equipos para tal propósito;

C_{rm} es el costo de las reparaciones mayores no rutinarias (*overhaul*), por ejemplo, reparaciones anuales; también comprende las modificaciones del equipo, incluyendo mano de obra, repuestos, herramienta y equipo necesarios para tal propósito;

C_{pd} es el costo de las partes de desgaste, es decir las partes que entran en contacto con la materia prima, pieza verde o producto semi-terminado e inevitablemente van a perder peso, forma, tamaño, etc. Ejemplos: cuerpos moledores, troqueles, cuchillas de corte, llantas, pastillas para frenos, etc.

¿Cómo ayuda Mantenimiento a cumplir con costos de operación razonables?

- Asesorando al personal que opera el equipo, para que apliquen “buenas prácticas de manufactura”, acorde a recomendaciones de fabricante, a las experiencias adquiridas de máquinas similares en la propia compañía o en otras del ramo.
- Haciendo seguimiento y analizando las causas de las variaciones en los consumos de combustibles, lubricantes, filtros, análisis a aceites en uso, e implementando acciones correctivas cuando se detecten desviaciones sensibles.
- Trabajando de manera conjunta con los departamentos de producción, fijando estándares de rendimiento de las partes de recambio y desgaste, bajo condiciones predeterminadas.
- Haciendo seguimiento y analizando las causas de las variaciones en los rendimientos de partes de recambio y desgaste, e implementando acciones correctivas cuando se detecten desviaciones sensibles.

Es necesario tener en cuenta que una empresa que tenga control de sus costos y gastos debe manejar Indicadores o referentes que le permitan determinar si la situación está bajo control o se está desviando del *debiera*.

Los Indicadores se tratarán adecuadamente en el Capítulo 12, sin embargo, a modo de ejemplo, algunos de ellos son:

- Costo Mantenimiento/unidad producida
- Costo combustible/unidad producida
- Unidades producidas/entre reafilados de un troquel

1.3.3. Maximizar la inversión en Planta y equipos, asegurando el cumplimiento de mínimo su vida útil esperada

Para comprender este objetivo es necesario hablar del *Costo de Posesión CP* (fórmula 2), es decir el costo en que se incurre por el sólo hecho de adquirir la máquina/equipo y tenerla en la empresa, así opere o no.

$$CP = VRN + DP + SI \quad (2)$$

Donde

CP es el costo de posesión de una máquina/equipo;

VRN es el valor de reposición o nuevo; es el costo del equipo al momento de la adquisición o el costo de reponer el equipo una vez que llegó al final de su vida útil. **Nota:** Vida útil es la duración o rendimiento que puede alcanzar una máquina, equipo u objeto, cumpliendo correctamente con la función para la cual ha sido creado;

DP es la depreciación o reducción paulatina de valor que sufre una máquina debido al deterioro normal que sufre durante su operación. Regularmente la depreciación está asociada a la vida útil. Existen modelos de Ingeniería económica para la DP, de ellos se destacan los modelos de *depreciación lineal* y de *depreciación acelerada*;

SI es el valor de las pólizas de seguros de toda índole e impuestos que se deben pagar por la posesión del equipo. Estos seguros no deben confundirse con la seguridad social.

Cuando una Compañía adquiere una máquina/equipo se hace una proyección de costos tomando como referencia una cierta vida útil de n años, operando a una cierta tasa de producción, con unos determinados CO y, adicionalmente, en cada período contable se debe provisionar la fracción respectiva de VRN. Se espera que al finalizar la vida útil, la inversión hecha en la máquina/equipo debe haber retornado completamente y debe estar disponible el dinero para comprar la máquina de reemplazo.

En el contexto anterior pueden suceder varias situaciones:

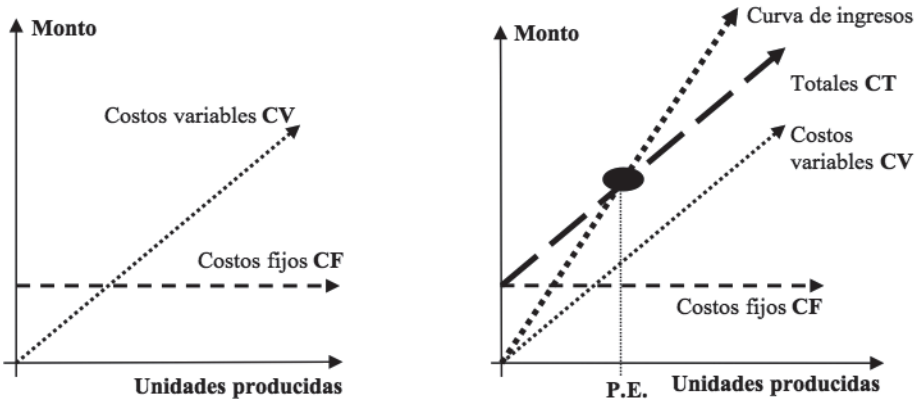
- Operando a una tasa de producción normal, y con una buena política de Mantenimiento el equipo/máquina complete su vida útil prevista de n años; este es el “debiera”.

- Operando a una tasa de producción normal, y con una mala política de Mantenimiento el equipo/máquina no alcance a completar su vida útil. Esta es la situación que debe evitarse.
- Operando a una tasa de producción normal, y con una buena política de Mantenimiento el equipo/máquina complete su vida útil de n años y aún el equipo presente unos costos de operación bajos. Esta sería una situación ideal, ya que contablemente el equipo vale *cero*, está operativo y aún se puede percibir ingresos con su uso (ver *capítulo 19*).
- Si el deterioro de la máquina/equipo por mal mantenimiento o mal uso es muy elevado, se debe evaluar conjuntamente con la división financiera de la compañía el costo de llevar el equipo a un nivel cercano al nominal (*overhaul*) y decidir si justifica económicamente la inversión, o si es mejor dar de baja al equipo.

Con base en los costos de operación y posesión se calcula el Costo de Operación y Posesión COP (fórmula 3).

$$COP=CO+CP \quad (3)$$

Una forma alterna y complementaria de visualizar la fórmula (3), empleada por algunas empresas (con una operación ya estabilizada), es manejar una estructura de costos conformada por *Costos fijos CF* y *Costos variables CV*. Los costos fijos CF corresponden a pagos que deben efectuarse así la empresa produzca o no produzca, por ejemplo, arrendamientos, nómina administrativa y operativa del personal de planta, vigilancia, impuestos, etc. Los costos variables CV son aquellos cuyo monto depende de que haya mayor o menor producción, por ejemplo, materia prima, combustibles, horas extras, nómina de personal temporal, etc. La Figura 8 ilustra el comportamiento de CV y CF, los cuales se suman para conformar los *Costos Totales CT*.

Figura 8. Comportamiento de los costos fijos, variables y totales de una empresa

De la Figura 8, fácilmente, se puede inferir que lo ideal en una empresa es que los costos fijos fuesen *cero*, es decir que el costo total CT solo estuviese conformado por costos variables. Esta situación es por supuesto muy difícil de alcanzar en la realidad, pero los gerentes y administradores de mantenimiento deben tenerla como un ideal y direccionar su gestión en ese sentido.

Es conveniente recordar además que solo en el momento que la *Curva de Ingresos* corte la curva de *Costos totales CT*, de allí en adelante será rentable la operación de la empresa; a este punto en particular se le denomina punto de equilibrio P. E., y es función de los gerentes y administradores determinar su valor, para la situación particular de cada empresa. Por último, en este breve panorama de costos, la tabla 1 muestra una estructura de costos de una microempresa, la cual en el mes en estudio está dando pérdida.

Tabla 1. Estructura de costos de una microempresa (en COP)

Ingresos	\$	10 000 000	
Unidades producidas		1000	
Costo promedio de venta	\$	10000.0	
1 Costos fijos (miles)			
		Aquellos que se pagan haya o no haya producción	
1.1 Capacidad instalada			
Arrendamientos	\$	600 000	
Depreciación	\$	500 000	
Leasing y amortizaciones	\$	300 000	
1.2 Operación			
Fijo Energía eléctrica	\$	100 000	
Fijo Agua	\$	100 000	
Seguros a la propiedad	\$	300 000	
Impuestos a la propiedad	\$	100 000	
Vigilancia	\$	1 500 000	
Nómina corporativa	\$	1 500 000	
1.3 Programados	\$	-	
Publicidad	\$	100 000	
Inversiones	\$	300 000	
Total costos fijos	\$	5 400 000	
Costo marginal	\$	5 400	
2 Costos variables (unitario)			
		Aquellos que varían en función de la producción	
		(\$/unidad producida)	Total (millones)
2.1 Materia prima	\$	3 000	\$ 3 000 000
2.2 Mantenimiento	\$	600	\$ 600 000
2.3 Nómina de producción	\$	2 000	\$ 2 000 000
2.4 Otros materiales producción	\$	100	\$ 100 000
2.5 Energía eléctrica producción	\$	150	\$ 150 000
2.6 Agua producción	\$	120	\$ 120 000
Total costos variables	\$	5 970	
			\$ 5 970 000
Utilidad		-14%	

A título de ejercicio se le plantea al lector identificar en la Tabla 1 los rubros correspondientes a *Costos de operación*, *Costos de Posesión*, e identificar algunas medidas que ayudarían a la empresa a salir del estado temporal de pérdida.

1.3.4 Garantizar que las máquinas/equipos operen de manera segura para los usuarios y para el medio ambiente

No solo se debe garantizar que los equipos operen, sino que además deben operar de manera segura para los usuarios y evitando arrojar efluentes que sobrepasen los límites permitidos por las autoridades ambientales, en cuyo caso se generan multas y sanciones para la empresa, que pueden llevar a su cierre. Mantenimiento debe tener en cuenta las series de normas ambientales (ISO 14000), de Seguridad Industrial y Salud Ocupacional (OHSAS 18000) y de gestión del riesgo (ISO 31000) durante sus diferentes labores, de forma tal que se garantice la integridad física, mental y emocional de sus colaboradores, y adicionalmente se preserve el medio ambiente.

1.4 Acciones básicas del mantenimiento

Por compleja que sea la estructura de Mantenimiento en una organización, su operación siempre podrá desagregarse en *acciones básicas* como las mostradas en la tabla 2. Cabe señalar que las actividades están desagregadas acorde con la estructura dinámica propuesta previamente en la Figura 3 (Numeral 1.2.3).

Tabla 2. Actividades básicas del Mantenimiento

Administrativa	Planear	Elaborar presupuestos generales
		Recomendar cambio máquinas/equipos
		Seleccionar equipos/máquinas
Administrativa	Programar	Cronograma actividades
		Instrucción actividad
		Insumos, repuestos, herramientas
		Personal ejecutante
		Tiempo de ejecución
Operativa	Ejecutar	Instalar
		Poner a punto (ajustar)
		Calibrar
		Inspeccionar
Continuación Tabla 2		
Operativa	Ejecutar	Limpia
		Lubricar
		Cambiar
		Reparar
		Modificar
Operativa	Medir	Recolectar y procesar información de campo
Administrativa		Elaborar indicadores
Administrativa		Registrar actividades desarrolladas
Administrativa	Controlar	Comparar resultados obtenidos versus lo planeado, y tomar decisiones (revisar y ajustar los planes)

1.5 Sistemas de mantenimiento

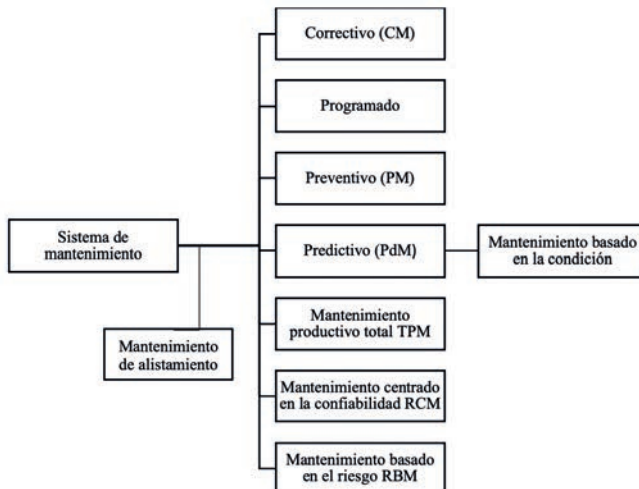
Existen unas metodologías o estrategias generales que adoptan las empresas para administrar y ejecutar el Mantenimiento, las cuales pueden ser tan simples como el *no hacer* (Mantenimiento Correctivo de emergencia) hasta las más modernas como el Mantenimiento Basado en el Riesgo MBR y el mantenimiento en la industria 4.0. En la Figura 9 se presenta un panorama gráfico de dichos sistemas, los cuales serán descritos seguidamente. Puede notarse que aparece un recuadro titulado *Mantenimiento de preparación*, entendiéndose éste como todas las actividades necesarias de realizar, antes de proceder a efectuar una intervención de mantenimiento; como ejemplos de actividades de preparación o alistamiento se tienen: consecución de repuestos, alistamiento de herramientas y equipos de apoyo, fabricación de partes, preparación de espacios para desensamble, entre otros. El *Mantenimiento de preparación* es transversal a todos los demás sistemas de Mantenimiento.

1.5.1 Mantenimiento Correctivo o a la falla o de emergencia CM (*Corrective Maintenance*)

Sistema de mantenimiento en el que se interviene un equipo una vez que ha ocurrido una falla funcional o que se hace evidente que va a ocurrir una avería mayor (falla potencial). Atendiendo a las definiciones de Falla funcional y Falla potencial descritas en 1.2.2 el Mantenimiento correctivo se subdivide en:

- Correctivo de emergencia
- Correctivo programado

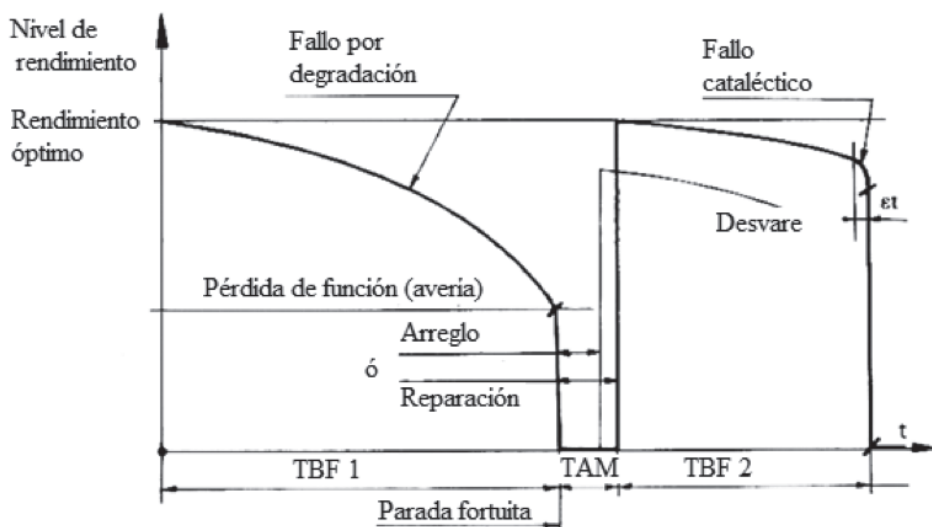
Figura 9. Sistema de Mantenimiento



El **Correctivo de emergencia** tiene lugar cuando ocurre una *falla funcional* dentro de la jornada de producción de la empresa, y generalmente detiene o trastorna la producción. Puede generar pérdidas de producción, accidentes laborales, incumplimientos a los clientes, problemas de calidad, daños ambientales. El **Correctivo programado** tiene lugar cuando se hace evidente una *falla potencial*, pero su efecto no es dramático y permite culminar la jornada o el ciclo de producción, para proceder a realizar las correcciones necesarias.

La Figura 10 presenta un gráfico de Nivel de rendimiento versus tiempo transcurrido, correspondiente al ciclo de mantenimiento correctivo. Se observa claramente como el Tiempo entre Fallas TBF (*Time Between Failure*) se va reduciendo paulatinamente, en la medida que ocurre cada avería hasta que por último, ocurre la falla cataléctica o catastrófica; una falla cataléctica obliga a evaluar la relación costo – beneficio de cambiar el equipo o efectuarle una reparación general u *overhaul*; en relación con lo anterior, en la medida que disminuye el TBF, es más alto el nivel de rendimiento en el cual ocurre la falla.

Figura 10. Ciclo gráfico del Mantenimiento Correctivo. Tomado de [6]



Una curva de interés en la Figura 10 corresponde a la marcada con el texto *Desvare*, la cual representa la situación muy común en el ámbito colombiano consistente en efectuar una reparación de baja calidad y dar prontamente al servicio la máquina/equipo. En el desvare no se lleva la máquina a su nivel de rendimiento previo a la varada, y adicionalmente se corre el riesgo de volver a vararse prontamente y con mayor severidad.

Se debe evitar a toda costa la ocurrencia de correctivos de emergencia en las máquinas/equipos indispensables en la producción, pero se puede tolerar en equipos que no sean vitales en ella, por ejemplo, lámparas, prensas de banco. Por bien administrado que esté el Mantenimiento en una empresa siempre será necesario un porcentaje de Mantenimiento Correctivo programado, debido al normal desgaste y deterioro de los diferentes componentes de las máquinas/equipos. La tabla 3 relaciona las ventajas y desventajas de aplicar Mantenimiento Correctivo.

1.5.2 Mantenimiento Programado

Es aquel que se ejecuta deteniendo el equipo cada que se cumpla un lapso predeterminado, procediendo luego a llevar unas actividades de limpieza, lubricación, desarme, cambio de partes de recambio y posterior rearme; generalmente el lapso es el recomendado por el fabricante del equipo, desconociendo la cantidad e intensidad real de trabajo que haya efectuado el equipo.

Tabla 3. Ventajas y desventajas del Mantenimiento Correctivo

Ventajas	Desventajas
No implica detalladas planificaciones o programaciones. No exige organización técnico-administrativa. En el corto plazo es un sistema de mantenimiento económico.	Conlleva a la ocurrencia de fallas funcionales, con todas las consecuencias que ello acarrea. (Ver numeral 1.3.1). Se les infringen daños y desgastes sistemáticos y prematuros a las máquinas / equipos. Se acorta su vida útil En el mediano y largo plazo es muy costoso.

La Figura 11 presenta un gráfico de Nivel de rendimiento versus tiempo, correspondiente al ciclo de mantenimiento Programado, del cual se pueden hacer varias precisiones, respecto de lo predicho por el fabricante:

- El equipo se inspecciona periódicamente (puntos i_i de la gráfica) con base al tiempo medio entre fallas (*MeanTime Between Failure* MTBF).
- Una vez definido el MTBF, se calcula un *límite de admisibilidad* del nivel de rendimiento ($K \times \text{MTBF}$), punto en el cual el equipo se detiene de manera programada, se interviene y se recupera su nivel de rendimiento óptimo, antes de “echarlo a andar” de nuevo.

El Mantenimiento programado presupone falsamente que las partes se desgastan y deterioran de la misma manera y a la misma velocidad. **Premisa:** Se puede disponer de dos máquinas/equipos idénticos físicamente, pero no se pueden hacer

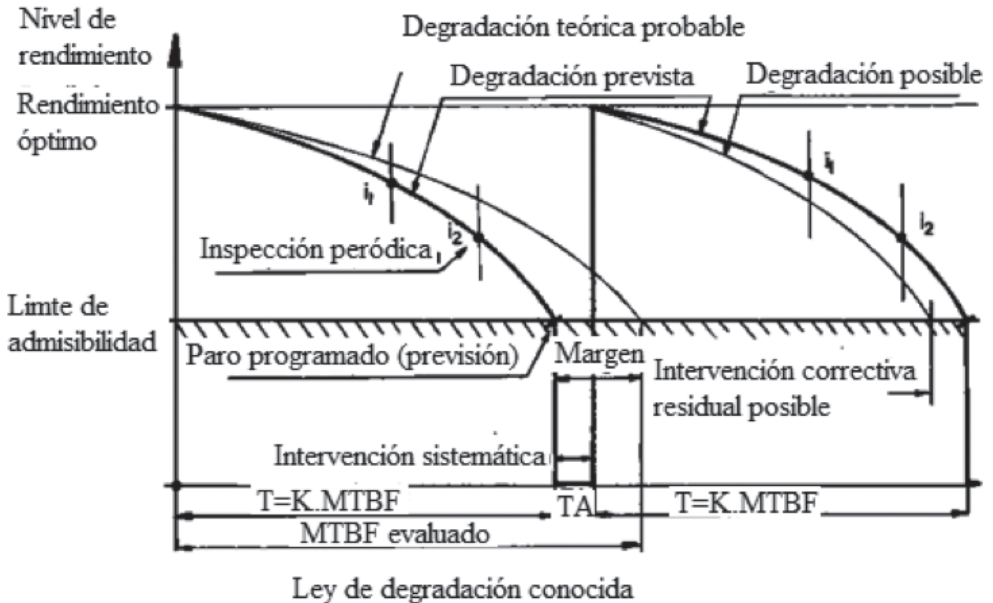
predicciones generalizadas frente a su comportamiento, estado y deterioro, debido a que en la realidad entran a formar parte de una trilogía *máquina/equipo – operador – medio ambiente*, que en muchas ocasiones hace que máquinas idénticas de fábrica, presenten en la realidad rendimientos, estados y vida útil muy diferentes. La tabla 4 presenta un resumen de las ventajas y desventajas del Mantenimiento Programado.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del Mantenimiento Programado

Ventajas	Desventajas
Es más científico que el Mantenimiento Correctivo.	Se van introduciendo pérdidas sucesivas de los ajustes de fábrica a la máquina debido a los continuos desarmes del equipo, lo que puede ser contraproducente en el mediano y largo plazo.
Se anticipa y reduce la ocurrencia de Fallas funcionales.	Genera sobrecostos puesto que las partes se cambian estén o no lo suficientemente desgastadas.

Figura 11. Ciclo gráfico del Mantenimiento Programado

Tomado de [6]



1.5.3. Mantenimiento Preventivo PM (Preventive Maintenance)

Es un sistema de Mantenimiento cuyo objetivo esencial es prevenir la ocurrencia de fallas en un sistema productivo, con base en la ejecución de unas tareas básicas (Observar, Inspeccionar, calibrar, ajustar, cambiar, lubricar, reparar, etc.), a unas frecuencias predeterminadas, asociadas a cada ciclo productivo en particular. La ejecución de las tareas básicas puede indicar la necesidad de realizar tareas programadas adicionales (mantenimiento correctivo programado, modificaciones, *overhaul*, etc.). La Figura 12 presenta un gráfico *básico* de Nivel de rendimiento versus tiempo, correspondiente al ciclo de mantenimiento Preventivo y en la Tabla 5 se presenta un listado de ventajas y desventajas del Mantenimiento Preventivo.

1.5.4. Mantenimiento Predictivo PdM (*Predictive Maintenance*)

Se basa en estudiar los síntomas de falla y *predecir* la ocurrencia de la falla de una máquina/equipo, midiendo y analizando los *cambios* en las variables de operación de esta. El Mantenimiento Predictivo es una fase avanzada del Preventivo, y se efectúan por un lado ensayos o pruebas sobre partes de las máquinas/equipos, y complementariamente se hacen mediciones de variables de operación.

Figura 12. Ciclo gráfico básico del Mantenimiento Preventivo

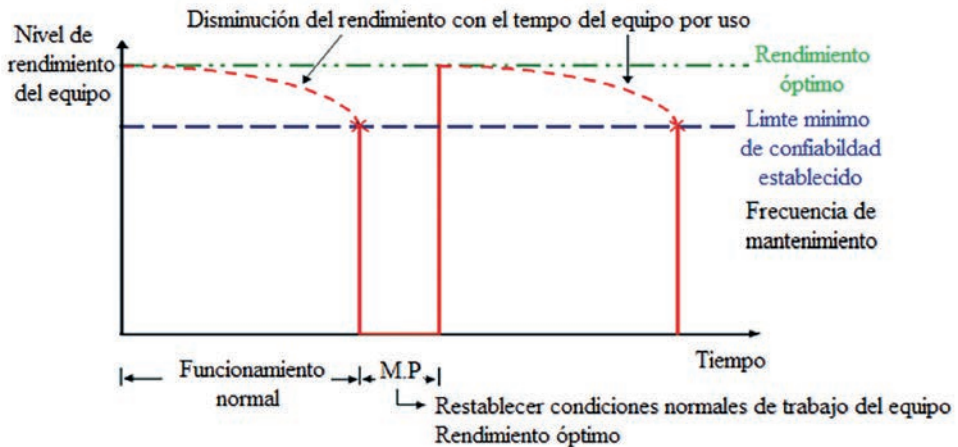


Tabla 5. Ventajas y desventajas del Mantenimiento Preventivo

Ventajas	Desventajas
<p>Aumenta la confiabilidad de las máquinas / equipos puesto que operan en mejores condiciones de seguridad, ya que se conoce su estado y sus condiciones de funcionamiento.</p> <p>Uniformidad en la carga de trabajo para el personal de Mantenimiento debido a una programación de actividades.</p> <p>Mayor duración de los equipos e instalaciones</p> <p>Disminución de repuestos en existencia y los costos asociados.</p> <p>Disminución del tiempo muerto, tiempo de parada de máquinas y equipos.</p> <p>Menor costo de las reparaciones.</p>	<p>Implica realizar una inversión inicial y sostenida en infraestructura y mano de obra.</p> <p>Si no se priorizan y eligen adecuadamente la cantidad y profundidad de las tareas de mantenimiento, se llegan a generar sobrecargas de trabajo que no aportan al desempeño y rendimiento de las máquinas.</p> <p>Alto costo en inspecciones.</p>

La Figura 13 presenta un gráfico de Nivel de rendimiento versus tiempo, correspondiente al ciclo de mantenimiento Predictivo. Para la variable en estudio debe definirse el valor del *límite de admisibilidad* y el valor de la *señal de alarma*. Periódicamente se harán mediciones de la variable, y en el momento que su valor alcance el valor de la *señal de alarma*, deberá programarse una intervención al equipo, para restituir su nivel de rendimiento. Si la señal de alarma es ignorada por el personal de mantenimiento se correrá el riesgo de sobrepasar el *límite de admisibilidad*, exponiéndose a la ocurrencia una avería mayor.

En la Tabla 6 se detallan las principales ventajas y desventajas principales de aplicar Predictivo.

Figura 13. Ciclo gráfico del Mantenimiento Predictivo. Tomado de [6]

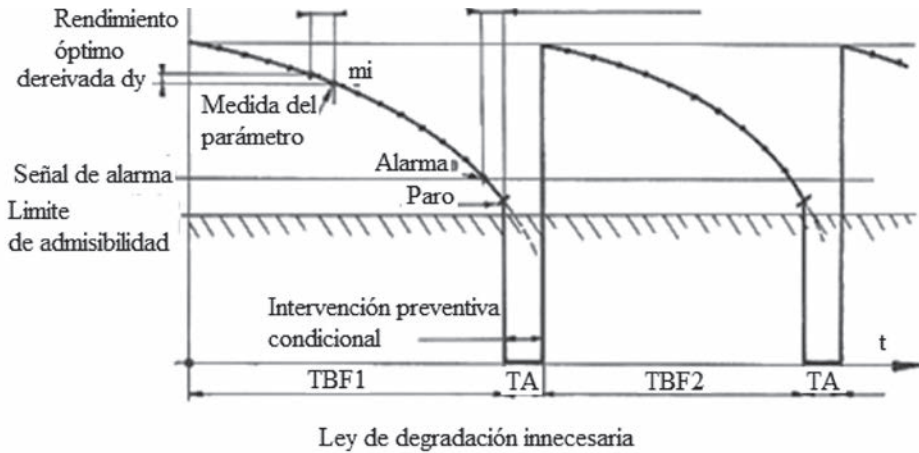


Tabla 6. Ventajas y desventajas del Mantenimiento Predictivo

Ventajas	Desventajas
<p>Brinda una alta posibilidad de anticiparse a la ocurrencia de las fallas, ya que se evidencia la gestación de esta, en la medida que la variable de referencia se salga de control.</p> <p>Muchas de los ensayos, pruebas y mediciones se hacen con la máquina en operación, por lo tanto, la afectación al proceso productivo es mínima.</p> <p>Reducción de los tiempos de intervención del equipo. El equipo se interviene cuando las pruebas y ensayos confirman que hay falla en gestación.</p>	<p>Muchas de sus técnicas y ensayos implican inversión en equipo costoso.</p> <p>Implica disponer de personal calificado tanto para la utilización del equipo como para el análisis de la información.</p> <p>Muchas de las técnicas y ensayos del <u>PdM</u> pueden indicar la falla en gestación, pero no su causa, por lo que es fundamental la labor de personal calificado.</p>

El Mantenimiento predictivo se apoya en tecnologías y técnicas específicas tales como: Análisis de vibraciones, termografías, análisis de aceites en uso, ensayo de tintas penetrantes, ultrasonidos, rayos X, ensayos con partículas magnéticas, etc.

1.5.5 Mantenimiento Productivo Total TPM (*Total Productive Maintenance*)

Más que un sistema de Mantenimiento, es la aplicación de toda una filosofía empresarial y personal, que busca maximizar la productividad en los procesos productivos. La Productividad (fórmula 4), es la maximización de la relación entre los resultados obtenidos versus los recursos empleados. Productividad no es producir más, sino producir bien, lo máximo con lo mínimo.

$$Pr = \frac{i}{r} \quad (4)$$

Donde

Pr es la productividad o maximización de la producción;
 i son los productos obtenidos;
 r son los recursos empleados.

El TPM busca alcanzar sistemas altamente productivos, eliminando las seis grandes pérdidas que los aquejan (daños de las máquinas, tiempos de alistamiento largos, productos de mala calidad, máquinas funcionando en vacío o a baja velocidad, accidentes en la planta y emisiones contaminantes) y pretende alcanzar plantas con:

- *Cero averías*
- *Cero setup o tiempo de alistamiento*
- *Cero defectos*
- *Cero despilfarros*
- *Cero accidentes*
- *Cero contaminaciones*

En el TPM el operario del equipo toma un papel protagónico en el Mantenimiento Preventivo de su unidad productiva, y se compromete en el incremento de la productividad a la totalidad del personal de una empresa, incluyendo la alta gerencia; para tomar ese papel protagónico el operador debe ser sensibilizado y capacitado, para ejecutar tareas básicas contempladas en el *Mantenimiento Autónomo*, tales como:

- Limpieza
- Lubricación
- Ajustes menores
- Reportes

Una fase inicial del TPM es la implementación del sistema de las 5S (sistema de mejoramiento continuo), el cuál puede ser implementado en cualquier empresa, independiente de su tamaño y tecnología. Las 5S (*Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke*) están asociadas con orden, aseo y mejoramiento continuado.

1.5.6 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM (*Reliability Centered Maintenance*)

RCM es una filosofía de gestión de Mantenimiento, que optimiza la confiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, en función de cuán críticos son los activos, tomando en cuenta los posibles efectos que originarán los modos de falla de dichos activos, sobre la seguridad, al ambiente, a las operaciones [7]. En este sistema de mantenimiento se pone especial énfasis en el funcionamiento global del sistema, más que en el de cada máquina/equipo individualmente; un equipo no es *intrínsecamente* importante, sino por la función que desempeñe dentro de un proceso productivo. En RCM la palabra clave es la *Confiabilidad* o Fiabilidad (*Reliability*).

La Confiabilidad de un equipo es posible evaluarla en términos cuantitativos, tal como lo indica la fórmula 5. El conocimiento de la confiabilidad y la disponibilidad de un equipo permiten planear la producción e incluso disponer de planes de contingencia.

$$TPEF = \frac{T_{op}}{N_{arr}} \quad (5)$$

Donde

$TPEF$ es la confiabilidad o tiempo promedio entre fallas;

T_{op} es el tiempo real de operación de la planta;

N_{arr} es el número de arranques de planta.

El RCM se apoya en estadísticas de falla, con las cuales se lleva a cabo un análisis de criticidad *CA* de las secciones o áreas de la planta y posteriormente se determina la criticidad de los subsistemas que conforman las máquinas/equipos, que hayan sido clasificados como críticos, aplicando una metodología de **Análisis de Modo y Efecto de Falla AMEF** (o **FMEA** por sus siglas en Inglés) obteniendo un parámetro llamado **Número de Prioridad de Riesgo NPR**; posteriormente, se pasa a determinar un plan de acción para dicho subsistema; el plan de acción puede indicar la aplicación de correctivo, preventivo, predictivo, instalar unidades redundantes o rediseñar el subsistema.

1.5.7 Mantenimiento Basado en el Riesgo RBM (*Risk Based Maintenance*)

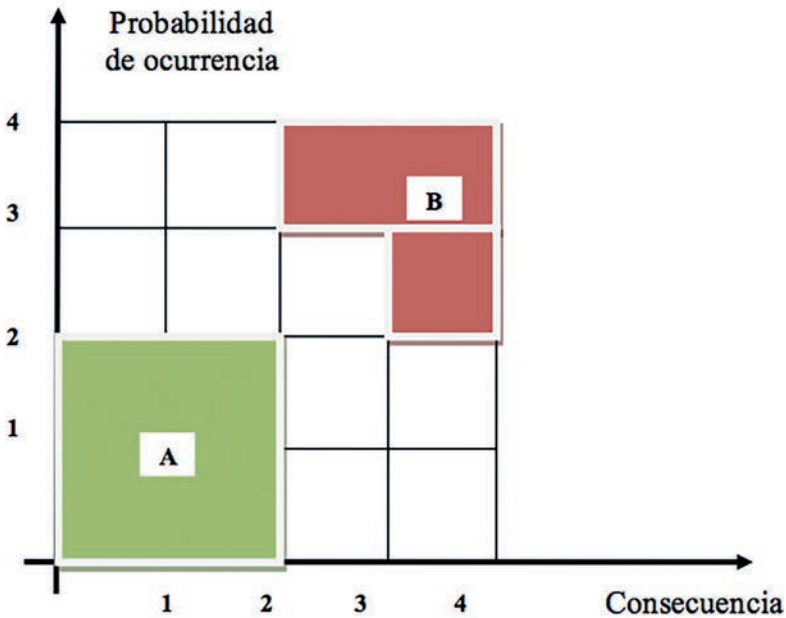
Sistema de Mantenimiento de última generación, en el que se direccionan los recursos de mantenimiento hacia los equipos que un análisis probabilidad-riesgo determine que son los más riesgosos. El RBM es especialmente apto para ser aplicado en plantas cuya operación encarna alta peligrosidad, como las petroquímicas, nucleares, biológicas, etc. La Figura 14 ilustra de manera básica la esencia del RBM; el área verde indica que hay poca probabilidad de que una máquina/equipo *A* falle de manera catastrófica y en el caso que ocurriese, las consecuencias (sobre la salud, sobre el medio ambiente y sobre otros equipos) serían poco importantes.

Por el contrario, para una máquina/equipo *B*, ubicado en la región roja indicaría una alta probabilidad de que ocurra una falla catastrófica, y las consecuencias serían elevadas, por lo tanto, a la máquina *B* hay que aplicarle planes de acción más elaborados y asignarle mayores recursos que a la máquina *A*. En RBM se hace uso de Sistemas Integrados de Seguridad SIS, con el objetivo de llevar el Riesgo a niveles aceptables o tolerables (el Riesgo no se puede llevar a un valor cero). A nivel industrial este tipo de mantenimiento lo desarrollan equipos multidisciplinarios de profesionales.

Por último, en este vistazo a los diferentes sistemas de Mantenimiento, es conveniente mencionar el *Mantenimiento Analítico*, el cual en sí mismo no es un sistema de mantenimiento, pero brinda herramientas que son transversales a los diferentes sistemas de mantenimiento tratados en este breve resumen. El *Mantenimiento Analítico* se basa preferentemente en el uso y análisis de las estadísticas de falla, para determinar la causa raíz de un problema y facilitar la posterior toma de decisiones. Primeramente, hace uso de Indicadores de Mantenimiento y posteriormente hace uso de técnicas como:

- *Root Centered Failure Analysis* R.C.F.A. o Análisis de la causa raíz de la falla
- *Failure Tree Analysis* F. T. A. o Árbol de análisis de fallas.
- Análisis de Pareto
- Diagrama Causa – Efecto.

Figura 14. Esencia del Mantenimiento Basado en el Riesgo



1.6 Evolución histórica del Mantenimiento

Todas las actividades que el hombre realiza han sufrido una evolución ligada a los diferentes momentos históricos, políticos y económicos. El Mantenimiento no escapa a dicha situación, tal como lo muestra la Figura 15. El Anexo 2 amplía los conceptos de Mecanización y Automatización mencionados en la Figura 15 y presenta un ejemplo de aplicación.

Las máquinas de la *primera generación* se caracterizaban por su elevada robustez física y en consecuencia su baja productividad; debido a la *baja resistencia específica* de los materiales de la época, se entraba a compensar esta falencia con mayores espesores y tamaños, siendo entonces los diseños poco esbeltos. Esta situación de alguna manera generaba máquinas confiables, pero con costos de operación muy elevados (mayor consumo energético para poner en marcha elementos grandes y pesados) y por ende las velocidades de operación eran bajas, reduciendo la productividad.

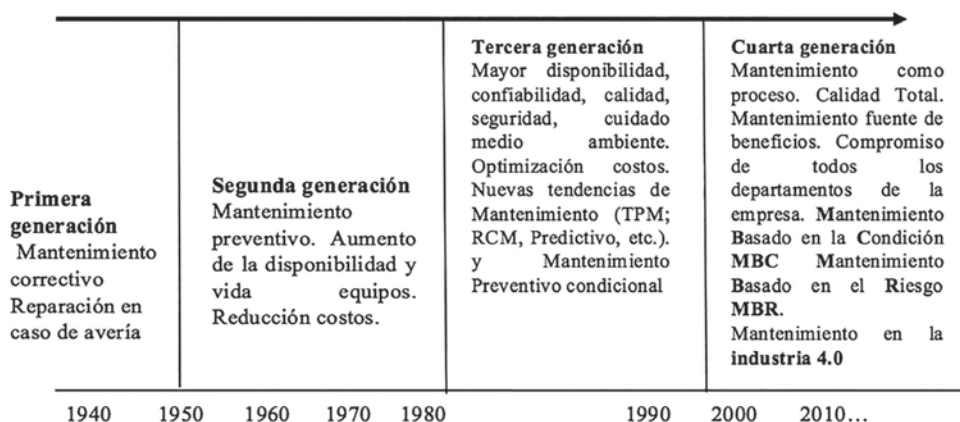
Lamentablemente, y como ha ocurrido de manera recurrente en la historia de la humanidad, las guerras son las que jalonan las investigaciones y los desarrollos. En la década de 1940 hubo una necesidad sentida de aumentar la productividad

de los procesos productivos de toda índole, en especial en el campo militar, para poder suplir el apetito voraz de la Segunda Guerra Mundial, y fue allí donde se hizo necesario fabricar máquinas más productivas, por ende, menos robustas, más esbeltas, más económicas y sin que hubiera avanzado sensiblemente la ciencia de los Materiales. Esta situación culminó en el advenimiento del Mantenimiento Preventivo, el cual reinó como el sistema de Mantenimiento por excelencia hasta la década de 1980, es decir en la *segunda generación*.

Desde la década de 1970, diversos estudiosos en los países más industrializados del mundo (especialmente en Japón) llegaron a un punto de encuentro en el que consensuaron que, a pesar de las bondades del Preventivo, generaba excesos de trabajo y no siempre los resultados eran los mejores. La Figura 16 ilustra dicha situación y un análisis rápido de ella, muestra la predisposición de un departamento de Mantenimiento a concentrarse en “apagar incendios”, es decir a atender averías importantes y averías mayores. Como resultado de estos análisis diversos expertos propusieron que quien estaba al frente de la máquina/equipo a diario, es decir el operario, era la persona más indicada para resolver de primera mano los 1000 problemas pequeños que se iban escalando hasta convertirse en una avería grave, fue así como surgió el TPM.

Figura 15. Evolución histórica del Mantenimiento

Aumento de la Mecanización y Automatización



Con la aplicación del TPM la pirámide de la Figura 16 se escala y se convierte en el trapecio y la pirámide de la Figura 17, en donde la labor de *apagar incendios* del Mantenimiento casi desaparece y el operario cumple una labor vital, atacando los problemas en la fuente, es decir en la minucia del día a día.

Figura 16. Indebido direccionamiento de la función Mantenimiento
Tomado de [8]

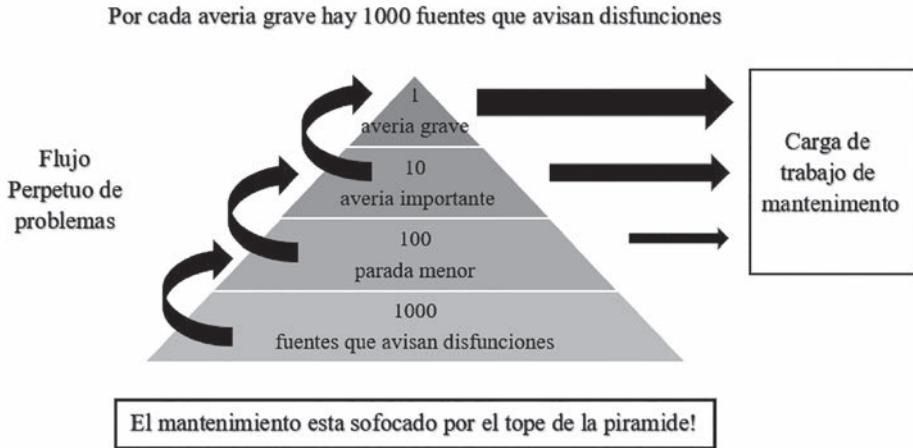
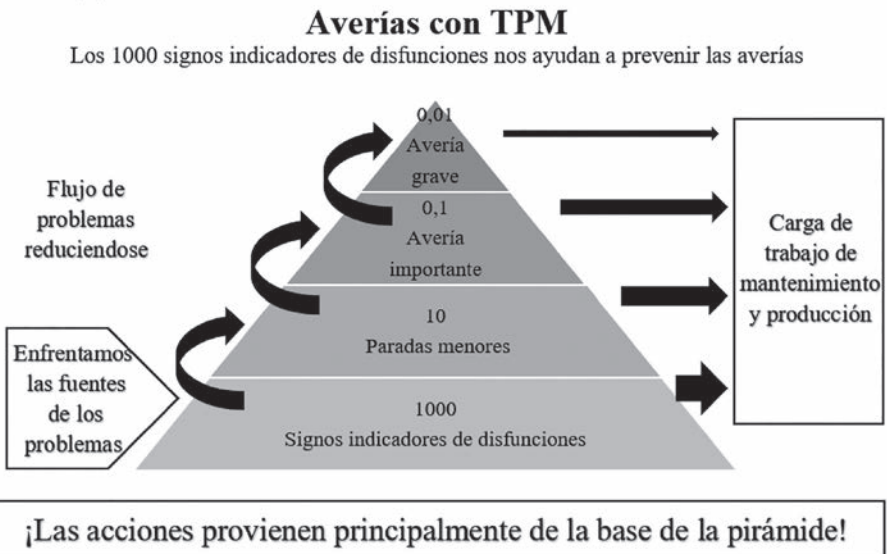


Figura 17. Escala de trabajo del mantenimiento en el TPM
Tomado de [8]



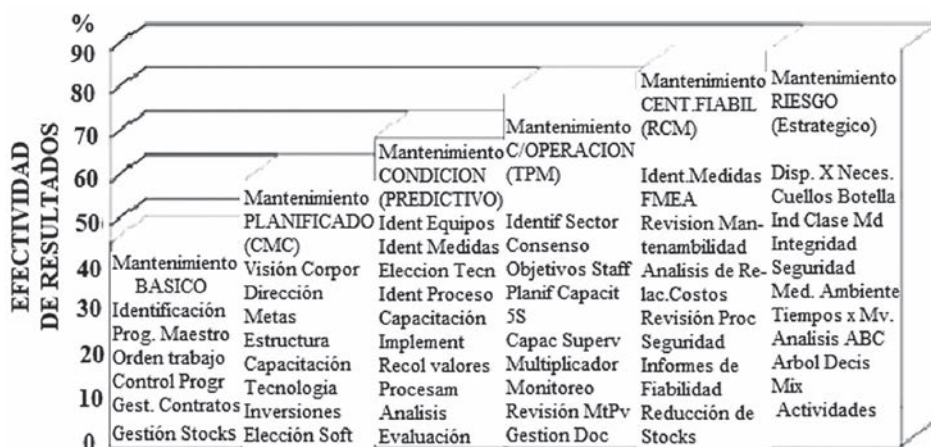
En la misma década de 1970 otros análisis bajo otras perspectivas dieron origen al RCM (Fuerza aérea de Estados Unidos), al PdM, al Mantenimiento Preventivo Condicional (MP asistido por instrumentación y con alarmas para puntos de disparo

de acciones), completando así la *Tercera generación* del mantenimiento.

Por último, y bajo miradas globales, holísticas, se llega a la *cuarta generación* del mantenimiento en la que se habla de Ingeniería y Gerencia de Mantenimiento, puesto que se trata de una fuente de beneficios para las empresas, diferente de lo que se pensaba 60 años atrás, cuando *Mantenimiento era gastar*. A partir de 2010, y con el advenimiento de la cuarta revolución industrial o Industria 4.0, la función Mantenimiento ha debido adaptarse a las nuevas tecnologías y paradigmas (*Internet of Things* IoT, fábricas inteligentes, *e-Maintenance*, *Computer Aided Testing & Maintenance* CAT&M). A la fecha de publicación del presente trabajo, la industria 4.0 es algo aún novedoso en Colombia, y su existencia es aún residual en grandes centros industriales, por ejemplo, de Bogotá o Medellín; en el numeral 4.7 se ha colocado la información necesaria para comprender su filosofía y el mantenimiento asociado a ella.

La Figura 18 ilustra como el sistema de Mantenimiento empleado conlleva al logro en mayor o menor medida de los resultados previstos. En este gráfico no aparece el *Mantenimiento Correctivo*, dada la alta aleatoriedad de sus resultados, y en el primer peldaño aparece el *Mantenimiento Preventivo* básico con una efectividad de resultados del 46%, y va ascendiendo hasta llegar al 90% ofrecido por el *Mantenimiento Basado en el Riesgo*.

Figura 18. Efectividad de los resultados en función del sistema o Tecnología de Mantenimiento empleada Tomado de [9]



Nota sobre Análisis ABC: Metodología de costeo de una empresa, que no solo atiende el análisis numérico por rubros como en la contabilidad tradicional, sino

que pone en marcha una metodología de búsqueda de costos encubiertos, para identificar puntos críticos y tomar los planes de acción correspondientes.

Lamentablemente, para la industria local de Pereira y Dosquebradas en la que el grueso de las industrias grandes aplica Preventivo [10] el panorama es sombrío y desalentador al observar que la efectividad de resultados con dicho sistema de Mantenimiento es muy baja, del orden del 46%. Este resultado puede hacerse extensivo a casi la totalidad del país, en donde diferentes estudios [11], han informado que el sistema de Mantenimiento que mayoritariamente se aplica es también Preventivo y eso explica en gran parte porque regularmente estamos lejos de los resultados exitosos de otras latitudes.

1.7 ¿Cuándo reemplazar un equipo de producción?

Esta es una pregunta recurrente en el día a día de muchos administradores de Mantenimiento, acosados por múltiples problemas, e-mail por responder, informes por enviar, etc. Julio Espinoza [12] presenta un modelo con el cual se pueden elaborar dos curvas de interés en este sentido.

En la Figura 19 se observa un gráfico de costo remanente del equipo CR y costo global del mantenimiento del equipo CM versus tiempo; el CR del equipo necesariamente va disminuyendo (recordar el concepto de depreciación mencionado en el numeral 1.3.3) y que el CM necesariamente va aumentando, influenciado principalmente por factores de obsolescencia, inadecuación e ineficacia del equipo. En el momento que las dos curvas se corten es el momento en que *financieramente* se recomienda cambiar la máquina/equipo; de allí en adelante cuesta más el mantenimiento de lo que contablemente vale la máquina.

En la realidad no siempre es posible el recambio mencionado, principalmente porque muchas empresas con administradores de visión inmedatista no provisionaron los dineros para reposición de máquinas/equipos o en otras ocasiones las condiciones socioeconómicas del país lo impiden. A continuación, las fórmulas 6, 7, 8 y 9 y los conceptos básicos asociados, permitirán comprender la esencia de la curva de la Figura 19.

$$RV = IV \times Fd \quad (6)$$

Donde

RV es el valor remanente teórico del equipo;

IV es el valor inicial del equipo;

Fd es la tasa de depreciación.

$$FVP = Fo \times Fi \times Fe \quad (7)$$

Donde

FVP es el Factor de Obsolescencia, Inadecuación e ineficiencia;

Fo es el Factor de obsolescencia;

Fi es el Factor de inadecuación;

Fe es el Factor de ineficiencia.

El Factor de Obsolescencia Fo , hace referencia a la influencia de los progresos tecnológicos, que tiende a producir equipos más baratos, más silenciosos, de menos volumen y peso, con materiales de mayor resistencia específica. Como consecuencia para un equipo antiguo será difícil y costoso conseguir repuestos y la mano de obra adecuada.

El Factor de Inadecuación Fi , hace referencia al efecto del cambio del entorno del equipo (ergonomía, velocidades de producción, ambientes físicos, agresividad mecánica, etc.).

El Factor de Ineficiencia Fe , hace referencia al desgaste y a la pérdida paulatina de tolerancias y ajustes de los componentes.

$$CR = (RV + SV) \times FVP \quad (8)$$

Donde

CR es el costo de reemplazo de la máquina/equipo;

SV es el costo de los repuestos en existencia en el almacén.

$$CM = CD + CTP \quad (9)$$

Donde

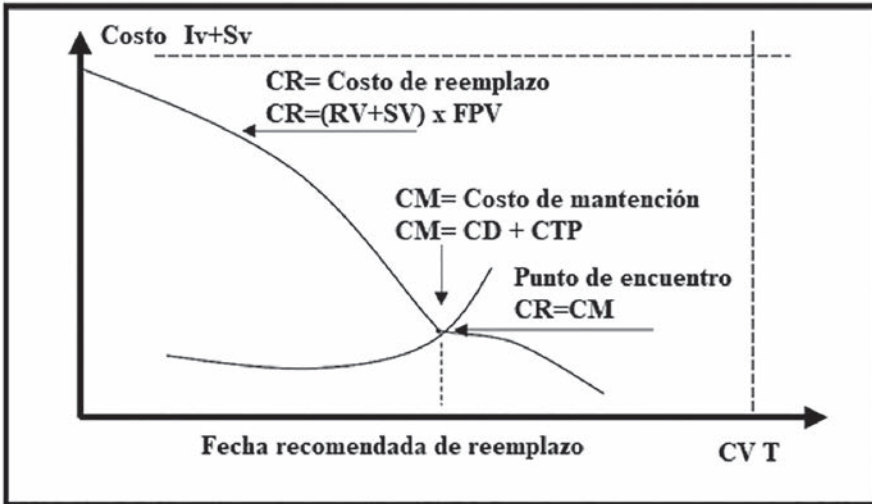
CM es el Costo total de mantenimiento;

CD es el Costo Directo por Mantenimiento (Mano Obra, repuestos);

CTP es el Costo generado por Tiempo Perdido por Mantenimiento.

El punto de encuentro ocurre cuando $CR = CM$, y se interpreta como el momento que se recomienda para reemplazar el equipo.

Figura 19. Curva Costo remanente CR, Costo de mantenimiento Cm para hallar fecha recomendada de reemplazo del equipo Tomado de [12]

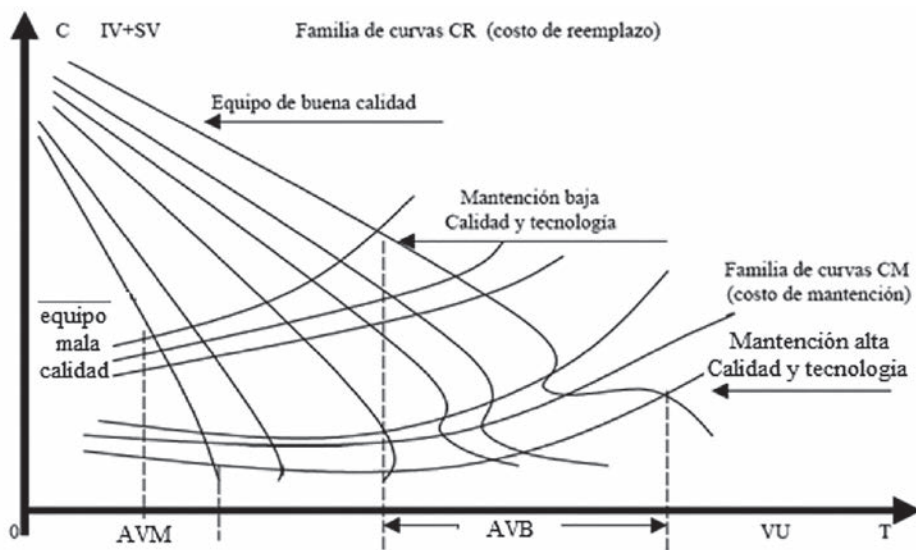


La Figura 20 presenta unas familias de curvas muy interesantes, que indican la influencia de la calidad del equipo (y por ende su costo de adquisición) en la variación de las curvas de Costo de reemplazo CR y en las curvas de Costos de Mantenimiento CM, en relación al tiempo en que el equipo es económicamente útil. Con respecto a la Figura 20, AVM es el período en el que es económicamente mantenible un equipo de mala calidad; AVB es el período en el que es económicamente mantenible un equipo de buena calidad y tecnología y VU es la Vida útil esperada de la máquina/equipo.

Es evidente entonces, que los equipos de baja calidad se deprecian rápidamente y que, si se pretendiese prolongar su vida útil con labores de mantenimiento, sería económicamente inadecuado. Por otro lado, los equipos de mejor calidad regularmente presentan una vida útil muy larga con un costo de mantenimiento CM que crece con pendientes muy bajas.

Las curvas 19 y 20 deberían servir de referente a un encargado de Mantenimiento al momento de decidir la compra de un equipo, entre varias opciones disponibles.

Figura 20. Curva de CR y CM versus vida económicamente útil, en función de la calidad del equipo Tomado de [12]



1.8 Preguntas de consulta o análisis

- Consulte sobre la esencia y modelos matemáticos de los modelos de Depreciación constante y variables.
- Tomando como base la tabla 1 (*Numeral 1.3.4*), reproduzca en una hoja electrónica Excel y gráficamente determine el valor del punto P.E.
- ¿Será posible erradicar por completo el Mantenimiento correctivo en una organización? Justifique la respuesta.
- Suponga la siguiente situación, Ud. va a ejecutar un proyecto puntual por un término no superior a un año, y los equipos que utilizará no le interesa tenerlos después de finalizar la obra. Con base en la Figura 20, ¿Qué tipo de equipos elegiría y por qué?

Ejercicio Propuesto 1 (con base al numeral 1.7)

Haciendo uso de la hoja electrónica Excel (valores en COP), elaborar las curvas CR y CM versus tiempo para la siguiente situación: Un administrador de una mediana empresa, asesorado por un Jefe de Mantenimiento adquieren un equipo cuyo costo inicial IV es de \$10 000 000 y se espera que opere continuamente durante 10 años.

El fabricante recomendó adquirir repuestos iniciales SV por un valor de \$400 000 y su valor se incrementará \$200 000 cada año. El costo rutinario de Mantenimiento CM tendrá un valor estimado de \$300 000 el primer año y posteriormente se incrementará \$100 000 cada año. ¿Cuál es el factor de depreciación F_d y el valor remanente RV, año a año? Al finalizar el quinto año, ¿Cómo estará la situación para propósitos de reemplazo del equipo? ¿Será que económicamente tiene sentido que el equipo trabaje la vida útil esperada? Si así es, ¿Cuántos años será económicamente rentable el equipo? ¿En qué región de la curva de la Figura 20 podría estar ubicado este equipo? Asuma $F_o = F_i = F_e = \text{constante} = 0,9$.

1.9 Para reflexionar. Mantenimiento ¿Una vía de escape al subdesarrollo?

En la década de 1960, en el suroeste asiático comenzó a perfilarse un fenómeno socioeconómico que años más tarde desembocó en la aparición y consolidación de los llamados “tigres de oriente” o “tigres asiáticos”, es decir, el grupo de países conformado por Corea del Sur, Taiwán, Hong Kong (que en el año 1997 regreso a manos de China), Singapur y Tailandia, los cuales presentaban una serie de características comunes:

- Habían sido colonias de potencias europeas (Gran Bretaña, Francia, Holanda, etc.).
- Fueron naciones afectadas por la segunda guerra mundial y oprimidos por diferentes actores (Japón principalmente).
- Poseían una población dedicada en su mayoría a la agricultura (sector primario) de subsistencia en áreas cultivables muy pequeñas (con respecto a las utilizadas en Colombia, por ejemplo).
- Sector secundario de la industria y la manufactura casi nulo.
- Analfabetismo elevado
- PIB e ingreso per-cápita muy bajos, sumado a grandes desigualdades sociales.

No obstante, el anterior cúmulo de dificultades, sus gobernantes lograron capitalizar las necesidades de algunos países desarrollados de fabricar a bajo costo, atraieron inversionistas extranjeros hacia sus respectivos países y comenzaron a manufacturar productos para la sustitución de importaciones de productos de bajo valor agregado.

Hasta aquí hay mucha similitud con la situación colombiana y las maquilas que aparecieron en nuestro país en aquella misma época, sin embargo y como factor diferenciador estuvo la decisión política de dichos estados de “apropiarse del *know-how*”, de la tecnología, de elevar el nivel educativo y de mejorar el índice de desarrollo humano IDH (indicador conformado por producto del Ingreso per-cápita, la Esperanza de vida y Alfabetismo) de sus habitantes.

Respetando las diferencias particulares de cada uno de los países en cuestión, en menos de 30 años, pasaron de ser economías agropecuarias, hambrientas y analfabetas, a ser manufactureros de productos de elevado valor agregado, sus PIB se elevaron sensiblemente, el ingreso per-cápita alcanzó niveles similares a los de países desarrollados, la infraestructura de vías alcanzó niveles muy elevados, el sistema educativo forma Magister y Doctores (Ph. D.) que suplen el mercado laboral y jalonan la investigación y los desarrollos, además, no solamente son receptores de inversión extranjera, sino que se convirtieron en suministradores de capital al resto del mundo, con lo cual su balanza comercial es muy equilibrada (exportaciones mayores o iguales a las importaciones).

Para diferentes autores, el punto crucial para alcanzar tal portento ha sido la voluntad política de los gobiernos de estos países, con la cual se volvió *política de estado* (y no del gobierno de turno como sucede a menudo en Colombia) el apropiarse de la tecnología, del conocimiento y el elevar el Índice de Desarrollo Humano de sus gobernados, lo cual finalmente elevó países tercermundistas al nivel de países desarrollados.

Recordando que el sector secundario de la economía (industria y manufactura) tiene un peso muy importante en el PIB, la aplicación sistemática del Mantenimiento Productivo Total TPM por los “tigres asiáticos”, en sus diferentes fases (Mantenimiento autónomo, 5S, *Just In Time*) permitió lograr un cambio paulatino de mentalidad que necesariamente conlleva a la disminución de tiempos de alistamiento de las máquinas, reducción de paradas imprevistas, operación del equipo a velocidades nominales, minimización de productos defectuosos, eliminación de cuellos de botella, lo cual finalmente se traduce en incremento de la **productividad** (relación entre los productos elaborados y los recursos empleados), con lo cual se mejora la competitividad en un mundo cada vez más globalizado.

Lamentablemente para Colombia, a pesar de haber tenido el mismo punto de partida que los “tigres de oriente”, los caminos que se recorrieron fueron muy diferentes de las exitosas sendas de oriente, y como se diría coloquialmente *nos bajamos del bus del desarrollo* y en este momento no hay comparación posible de nuestro país con dichas economías.

Dadas las situaciones anteriores se va a hacer una nueva comparación, la de nuestro país con otro país tercermundista o en vías de desarrollo, estamos hablando de la India, un país asiático también, pero con unas características muy peculiares de atraso y que de igual manera que los “tigres asiáticos” han logrado un milagro económico, social y cultural en muy pocas décadas; la India se independizó en 1947, de un sistema colonial agresivo impuesto por Gran Bretaña. En ese momento el renglón fuerte de la economía era el sector primario y su atraso tecnológico y de infraestructura era impresionante, sumado a lo anterior existía el lastre del *sistema de castas*, que aún no ha desaparecido en su totalidad en la India actual.

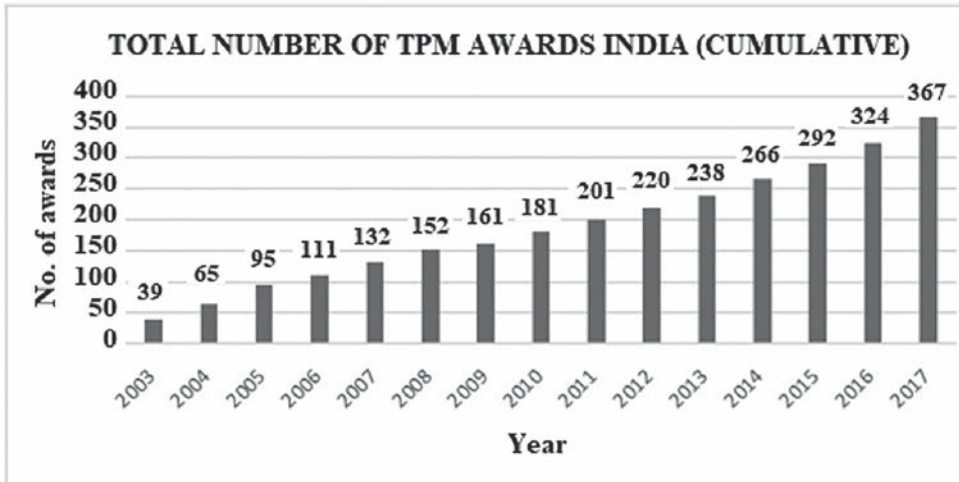
En poco tiempo y gracias a un esfuerzo denodado basado en planes quinquenales iniciados en 1951, el estado se ocupó de ciertos sectores clave e hizo grandes inversiones en otros, mientras que el sector privado estaba sujeto a una amplia variedad de controles estatales. Se crearon aranceles y otras barreras para proteger las industrias nacionales y se iniciaron diferentes programas de reforma agraria y de desarrollo de un estado industrial moderno.

La India, actualmente, es un país que cuenta con aproximadamente 1 372 millones de habitantes, el PIB ha venido creciendo a una tasa del orden del 8%, desde el 2004 a la fecha; al año 2015 su Indicador de Desarrollo Humano es de nivel medio 0,624 (en 2004 fue 0,504 y en 1999 era de 0,463), posee un gran potencial de mercado, un elevado crecimiento en la economía de servicios (terciario) y en la de tecnologías de la información y las comunicaciones, el sistema financiero es bastante sano y las empresas muy rentables, mantiene un buen ritmo de reformas hacia una economía más moderna y liberalizada y posee un nivel elevado de reservas en divisas. El anterior texto ha sido adaptado por el autor de: *India: ¿es sostenible el auge económico reciente?* Pablo Bustelo. Investigador Principal para Asia-Pacífico del Real Instituto Elcano y profesor titular de Economía Aplicada en la Universidad Complutense de Madrid¹).

A nivel de la manufactura, las empresas indias han venido adoptando y aplicando sistemáticamente TPM como sistema de mantenimiento y se han hecho socias del club TPM capítulo India; la Figura 21 ilustra la manera vertiginosa en que diversas empresas indias han ganado (a nivel India) el premio a la excelencia en TPM. De manera anecdótica, en 1995 por primera vez 1 empresa india ganó este premio.

1. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/India>

Figura 21. N° de empresas que aplican TPM ganadoras del premio a la excelencia (a nivel India) Tomado de [13]



Por último, este trabajo continuado de la empresa india en el aspecto Mantenimiento ha arrojado importantes resultados, en el concierto mundial, en el ámbito de la productividad (los cuales finalmente se reflejan en los indicadores macro-económicos del País). El *Japan Institute of Plant Maintenance* JIPM, una autoridad mundial en asuntos de mantenimiento productivo total, anualmente hace una evaluación de la aplicación y resultados del TPM entre los miembros de sus diferentes clubes en el mundo, y con base a ello hace una entrega de premios a la Excelencia en diferentes categorías.

En aras de dar claridad a las Tablas 7 y 8, es pertinente aclarar los requisitos que deben cumplir las empresas para alcanzar el Premio a la excelencia en TPM categoría A y el Premio a la excelencia en el compromiso consistente con el TPM.

Premio a la Excelencia en TPM, Categoría A:

- Deben haber transcurrido por lo menos 3 años desde la introducción del TPM
- Debe haberse aplicado la actividad basada en 8 pilares de TPM, por todos los miembros del personal de planta (mejoras individuales; mantenimiento autónomo, mantenimiento planificado; Gestión inicial; mantenimiento de calidad; administración y supervisión; educación y desarrollo; seguridad, saneamiento y control ambiental).

- Debe haberse completado el paso 4 para la actividad de mantenimiento autónomo.
- Debe haberse completado el desarrollo de la infraestructura para la actividad del TPM, con resultados tanto tangibles como intangibles

Premio a la Excelencia en el compromiso consistente con el TPM:

- Debe haberse recibido el Premio a la Excelencia en TPM (categoría A o B).
- Debe tener aproximadamente (2) años de actividad de progreso después de recibir el Premio a la Excelencia en TPM (categoría A o B).
- Debe estar aplicada la actividad basada en los 8 pilares de TPM, por todos los miembros del personal de planta.

La entrega de premios del *Japan Institute of Plant Maintenance* JIPM a la excelencia en TPM (*2018 TPM Excellence Awards outside Japan*), llevada a cabo en marzo de 2019 en Japón entregó los resultados (condensados por el autor del libro) en las tablas 7 y 8. La tabla 7 muestra los resultados a la excelencia en TPM, categoría A. Nótese que solo aparece una empresa de USA, 1 española, ninguna colombiana (en años anteriores aisladamente 1 empresa multinacional radicada en Colombia obtuvo este premio) y ninguna de un país africano. Por otra parte, 15 de las empresas de la india (38,5%) y 7 de la república popular China (17,9%) obtuvieron premios en esta categoría.

Tabla 7. Resultados condensados de la entrega de premios 2018. *Award for TPM Excellence, category A, outside Japan.* Tomado de [14]

2018 Award for TPM Excellence¹, Category A, outside Japan		
Total premios otorgados: 39		
Por continentes		
Europa	3	Suiza 1, Italia 1, empresas españolas: 1
USA	1	
Asia	30	15 India , 7 República popular China, 4 Tailandia, (2) Vietnam, (1) Cambodia, (1) Indonesia
Africa	0	
Latinoamérica y el Caribe	5	3 México, 1 Brasil, 1 Argentina

En la Tabla 8 se muestran los resultados al “Compromiso consistente con el TPM”. Nuevamente se destaca que empresas de la india obtuvieron el 52% de los premios,

y adicionalmente, se destaca la aparición de una empresa africana y ninguna de USA ni de Europa.

En ambas tablas es muy diciente el potencial de la industria india, y la relevancia que se le viene dando a la función mantenimiento en dicho país, reflejada en el semillero, ¡15 empresas ganadoras en categoría A! y de manera consecuente con lo expresado líneas arriba, muestra el elevado aporte de algunos de los “*tigres asiáticos*” (Tailandia e Indonesia), y el creciente aporte de Latinoamérica y el Caribe en este semillero.

Tabla 8. Resultados condensados de la entrega de premios 2018. *Award for Excellence in Consistente TPM Commitment outside Japan*. Tomado de [15]

2018 Award for Excellence in Consistent TPM Commitment, outside Japan. March 2019		
Total premios otorgados: 21		
Por continentes		
Europa	0	
USA	0	
Asia	19	11 India , 4 Tailandia, 2 República popular de China, 1 República de Corea, 1 Turquía (país transcontinental)
Africa	1	1 República de Suráfrica
Latinoamérica y el Caribe	1	1 México

En el caso específico de Colombia pocas empresas han adoptado de manera seria el TPM como filosofía empresarial, es más, ni siquiera hay club TPM como en otros países...

Estas cifras deberían convertirse en una invitación a reflexionar acerca de:

- La importancia de la función Mantenimiento en la productividad local, regional y nacional.

La ausencia de la función mantenimiento en las políticas de Estado colombianas (que se pueda traducir en resultados tangibles) relacionadas con productividad y competitividad. En el **Documento CONPES 3527. Política Nacional de Competitividad y Productividad. 23 de junio de 2008** no se hace mención a la función Mantenimiento.

CAPÍTULO DOS

Organización del departamento de Mantenimiento

2.1. Introducción

El presente capítulo entrega una visión acerca de dónde está ubicado el departamento o área de Mantenimiento con respecto al organigrama o estructura de mando de una organización. Una vez presentada dicha ubicación se ilustran algunas composiciones típicas al interior de los departamentos de Mantenimiento, válidas para medianas y grandes empresas. Es necesario precisar que tanto la ubicación como la composición de un departamento de Mantenimiento dependen entre otros factores, del tamaño de la empresa, de su *layout* de planta (ver *Anexo 1*), y de sus políticas financieras y económicas. Es conveniente antes de tratar los temas enunciados recordar los conceptos de empresa y su clasificación en micro, pequeña, mediana y gran empresa, en el contexto colombiano, y las definiciones de algunos cargos relacionados con Mantenimiento.

2.2. Algunas definiciones básicas

2.2.1. Relativas a empresas

Empresa: toda actividad organizada dedicada a realizar todos o algunos de los siguientes procesos: fabricación, transformación, distribución, comercialización, alquiler, de bienes o servicios, con el fin de satisfacer necesidades de los clientes y generar rentabilidad a los accionistas.

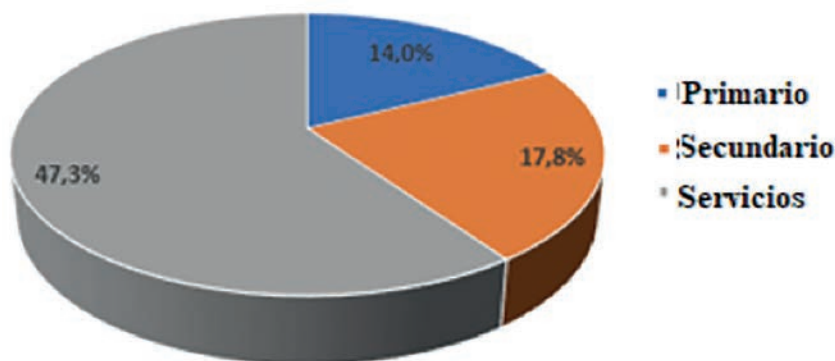
Según los enfoques clásicos, la economía se subdivide en tres sectores:

- Primario o agropecuario. Es el sector que obtiene un producto ejerciendo actividades directamente sobre la naturaleza, sin ningún proceso de transformación, tales como agricultura, la ganadería, la silvicultura, la caza y la pesca.
- Secundario o industrial. Comprende todas las actividades económicas de un país relacionadas con la transformación industrial de los alimentos y otros tipos de bienes o mercancías, los cuales se utilizan como base para la fabricación de nuevos productos. Se divide en dos subsectores: industrial extractivo (minería y petróleo) e industrial de transformación (envasado de legumbres y frutas, embotellado de refrescos, fabricación de abonos y fertilizantes, vehículos, cementos, aparatos electrodomésticos, etc.).

- Terciario o servicios. Incluye todas aquellas actividades que no producen una mercancía en sí, pero que son necesarias para el funcionamiento de la economía, como por ejemplo el comercio, los restaurantes, los hoteles, el transporte, los servicios financieros, las comunicaciones, los servicios de educación, los servicios profesionales, el Gobierno, etc.

En la actualidad, debido a su inusitado auge en cuanto a desarrollo y utilización, diversos estudiosos incluyen un sector cuaternario, correspondiente al manejo de la información y datos, aplicando tecnologías de punta. La Figura 22 ilustra la composición de la economía colombiana basada en los sectores clásicos y la Figura 23 discrimina el aporte de los principales subsectores.

Figura 22. Sectores económicos colombianos en 2014 . Tomado de [16]



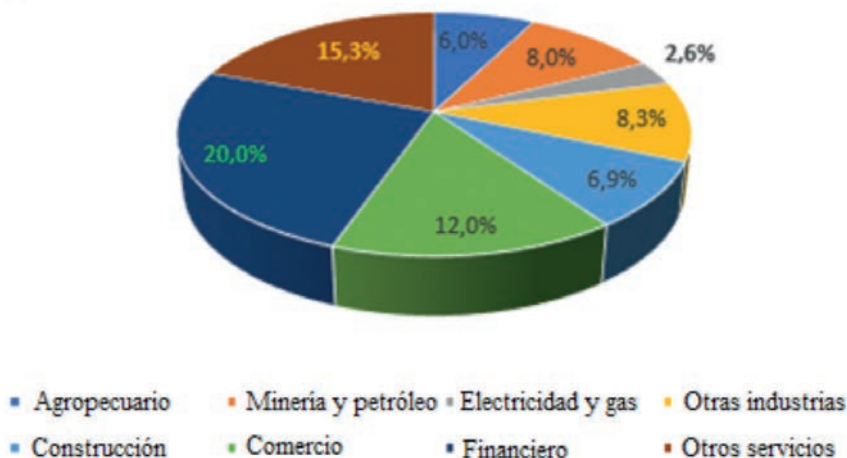
A continuación, se presentan unas definiciones alusivas a las clasificaciones de empresa, en función de su tamaño; estas definiciones se basan en la Ley para el fomento de la micro, pequeña y mediana empresa, Ley 590 (modificada posteriormente por la Ley 905 de 2004).

- **Microempresa.** Aquellas empresas cuyo número de empleados es igual o inferior a **10** personas y el volumen de activos del año (acorde al balance general anual) es inferior a **501** salarios mínimos legales vigentes SMLV. Microempresa también comprende las personas autónomas o independientes o auto-empleado (tendero, electricista, asadero de arepas, etc.).
- **Pequeña Empresa:** Su personal entre oscila entre **11 y 50** trabajadores y los Activos totales son mayores a **501** y menores a **5 001** SMLV.
- **Mediana:** Personal entre **51 y 200** trabajadores y Activos totales entre **5 001** y **30000** SMLV.

- **Gran empresa.** Es aquella cuya planta de personal es mayor a **200** trabajadores y cuenta con activos totales por un valor superior a **30 000** SMLV.

Figura 23. Subsectores económicos colombianos en 2014

Tomado de [16]



Comúnmente, a las Pequeñas y medianas empresa se les conoce con el nombre de PYME. De manera combinada, las PYMES corresponden al 4,9% del total de empresas del país (ver tabla 9). Por sectores las PYME, se concentran en actividades industriales basadas en el aprovechamiento de los recursos naturales, tanto de origen agropecuario como minero tales como Alimentos, Cuero y Calzado, Muebles y Madera, Textil y Confecciones, Artes Gráficas, Plástico y Químico, Metalúrgico y Metalmecánico, Autopartes y Minerales no Metálicos. Este grupo de sectores representa el 71% de la producción industrial. Si se excluye la refinación de petróleo y la industria petroquímica, la manufactura basada en el aprovechamiento de los recursos naturales representa aproximadamente el 60% del total industrial.

Es común agrupar las micros, pequeñas y medianas empresas haciendo uso del término MIPYME, y a su vez las MIPYME representan el 99,6% de los establecimientos, aproximadamente el 67,0% del empleo; el 12,22% de la producción manufacturera del país (ver tabla 9).

En la Tabla 9 se pueden apreciar algunas estadísticas tomadas y adaptadas del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, 2005 ([17, 18, 19]) y complementadas con algunos datos de 2016. No hay censos más recientes.

Tabla 9. Alguas estadísticas de empresas colombianas, de acuerdo con su tamaño
Tomado de [17,18, 19]

	Micro empresa	Pequeña empresa	Mediana empresa	Gran empresa
N° empleados	< 10	11 ≤ E < 50	51 ≤ E < 200	> 200
Activos fijos AF SMLV	< 501	501 ≤ AF < 5001	5001 ≤ AF < 30000	> 30000
% empresas en Colombia	94,7%	3,8%	1,1%	0,4%
N° empresas en Colombia	2 396 929	114917	29 107	10205
% Mano obra que ocupan	67%			33,0%

2.2.2. Definiciones relativas a cargos relacionados con Mantenimiento

Gerencia: proceso que implica la coordinación de todos los recursos disponibles en una organización (humanos, físicos, tecnológicos, financieros), para que aplicando de los procesos de: planificación, organización, dirección y control se logren objetivos previamente establecidos.

Gerente: Es aquella persona que en una determinada empresa u organización tiene la responsabilidad y las tareas de guiar a los demás, de ejecutar y dar órdenes y de lograr que las cosas se hagan para poder cumplir cierta y correctamente con el objetivo y la misión que promueve la organización. Haciendo la salvedad de las diferencias que se puedan dar en las diferentes organizaciones, existen seis responsabilidades básicas que constituyen la esencia de la acción de un gerente: (1) incrementar el estado de la tecnología de la organización; (2) perpetuar la organización; (3) darle dirección a la organización; (4) incrementar la productividad; (5) satisfacer a los empleados; (6) contribuir con la comunidad.

Jefe: Persona que manda o dirige a otras, que serán sus subalternos en una oficina, empresa, corporación, gobiernos, club, organismo, entre otros. Sobre el jefe recae la responsabilidad de definir, decidir, escoger las mejores opciones alternativas para que el funcionamiento del ámbito que dirige funcione, se desarrolle, crezca y por sobre todas las cosas, reine la armonía y el equilibrio, imprescindible para que todo ello se concrete y llegue a buen puerto.

Director: Persona encargada de dirigir una determinada actividad.

Superintendente: Persona encargada de la dirección de algo y que ejerce autoridad sobre el resto de las personas que trabajan en lo mismo.

Supervisor: Se aplica a la persona que se encarga de supervisar un trabajo o una actividad.

Capataz: Persona que manda y vigila a un grupo de trabajadores.

2.3 Ubicación de la función Mantenimiento dentro de la empresa

La ubicación de la función Mantenimiento en el organigrama (estructura de mando) de una empresa, depende del tamaño de esta (grande, mediana, pequeña). Las Figuras 24 a 30 muestran la ubicación del Mantenimiento en algunos organigramas genéricos de empresas.

Figura 24. Ubicación del Departamento en una empresa pequeña 1 Tomado de [2]

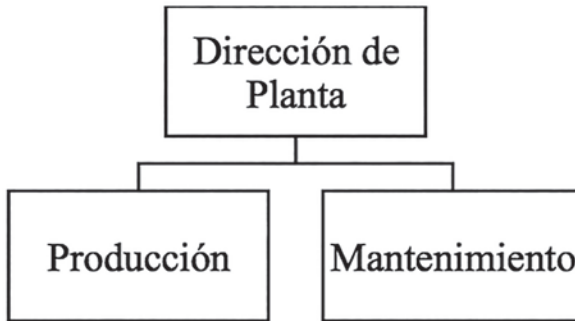


Figura 25. Ubicación del Depto. en una empresa pequeña 2 Tomado de [2]

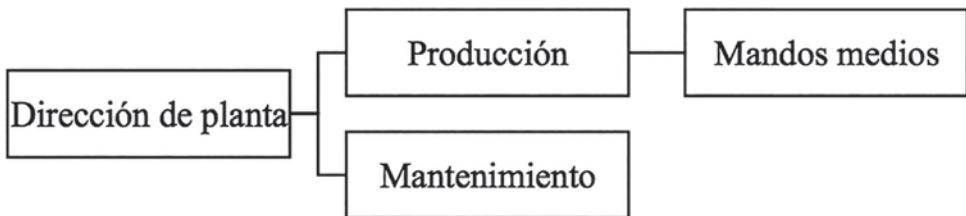


Figura 26. Ubicación del Departamento en una empresa pequeña 3 Tomado de [2]

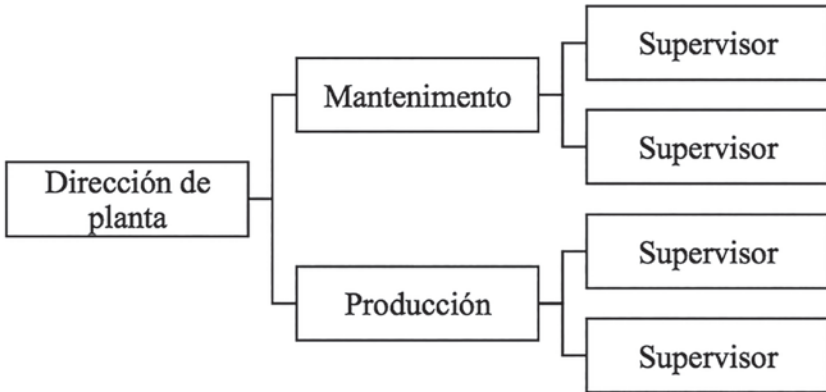


Figura 27. Ubicación del Departamento en una empresa mediana Tomado de [2]

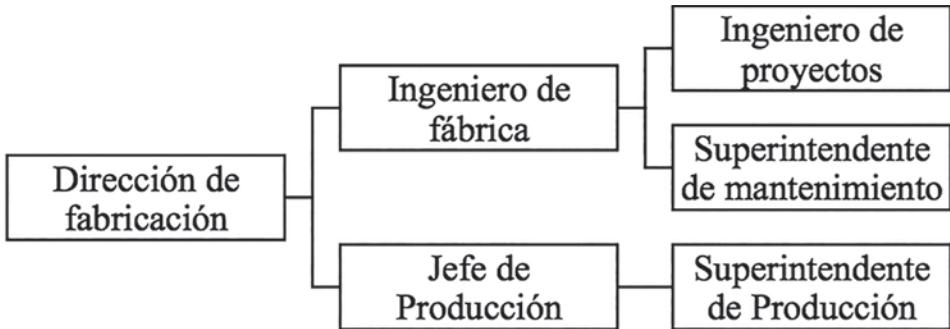


Figura 28. Ubicación del Departamento en una empresa grande 1 Tomado de [2]

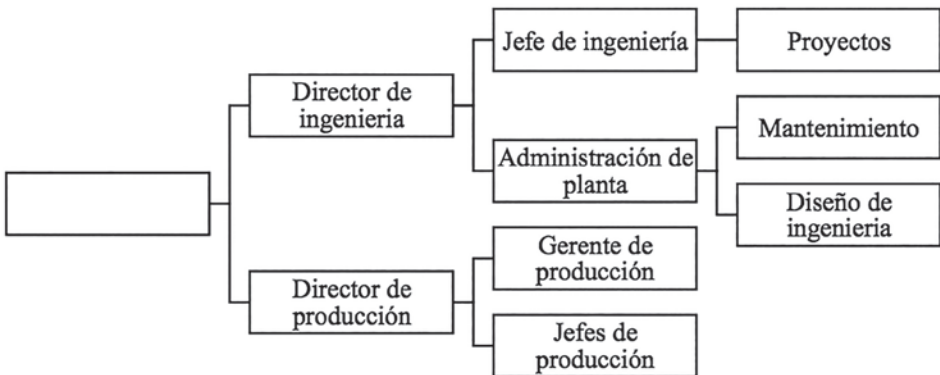


Figura 29. Ubicación del Departamento en una empresa grande 2
Tomado de [2]

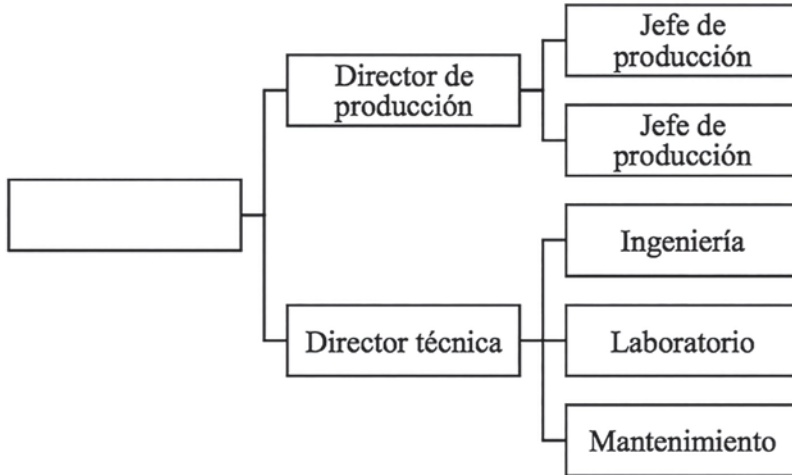
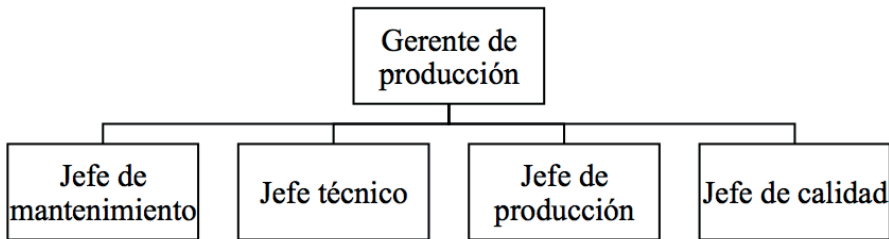


Figura 30. Ubicación de Departamento en una empresa grande 3
Tomado de [2]



Como una constante, en los diagramas anteriores, se puede apreciar que los departamentos de Mantenimiento y producción no dependen jerárquicamente entre sí, pero deben manejar una relación funcional sana y coordinada, en lo posible estando al mismo nivel jerárquico. En esquemas de administración antiguos (décadas de 1980 y anteriores), el departamento de Mantenimiento estaba supeditando al Departamento de Producción, lo que tenía como consecuencia, que la prioridad la tuviese la producción, generando conflictos entre las dos áreas, con las consecuencias económicas y anímicas que ello acarrea.

2.4. Algunas estructuras típicas de los departamentos de mantenimiento

En el interior de un departamento de Mantenimiento, existen también diferentes composiciones y organigramas típicos. Las Figuras 31 a 33 ilustran algunas de dichas estructuras, válidas para grandes y medianas empresas.

Figura 31. Organigrama Depto. de Mantenimiento. Sistema formal centralizado
Tomado de [2]

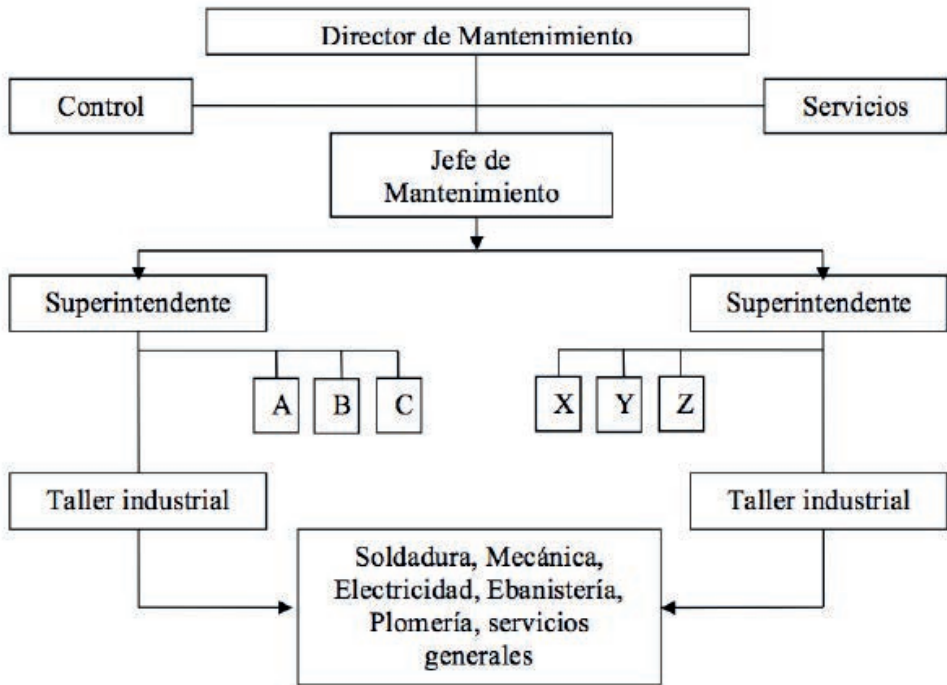


Figura 32. Organigrama Depto. de Mantenimiento. Sistema formal centralizado.
Tomado de [2]

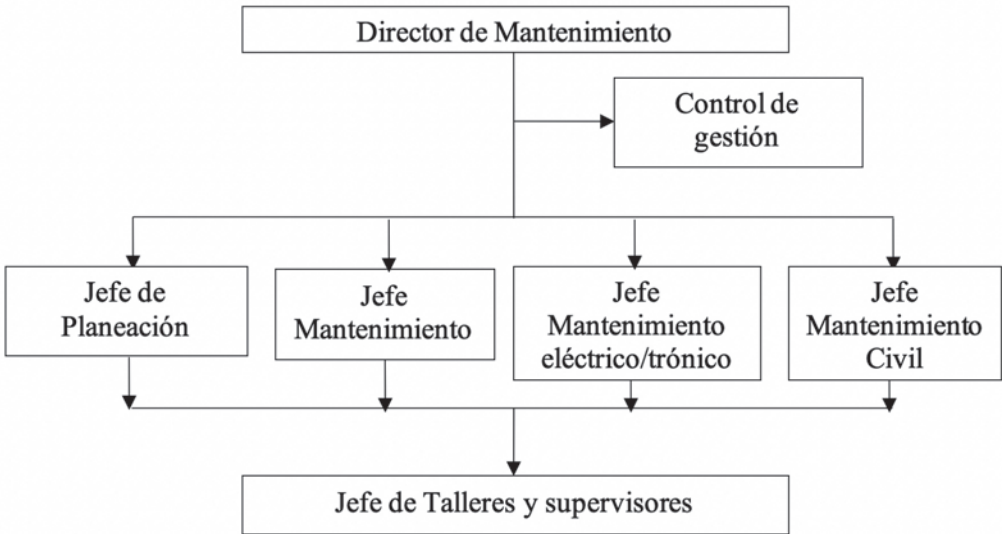
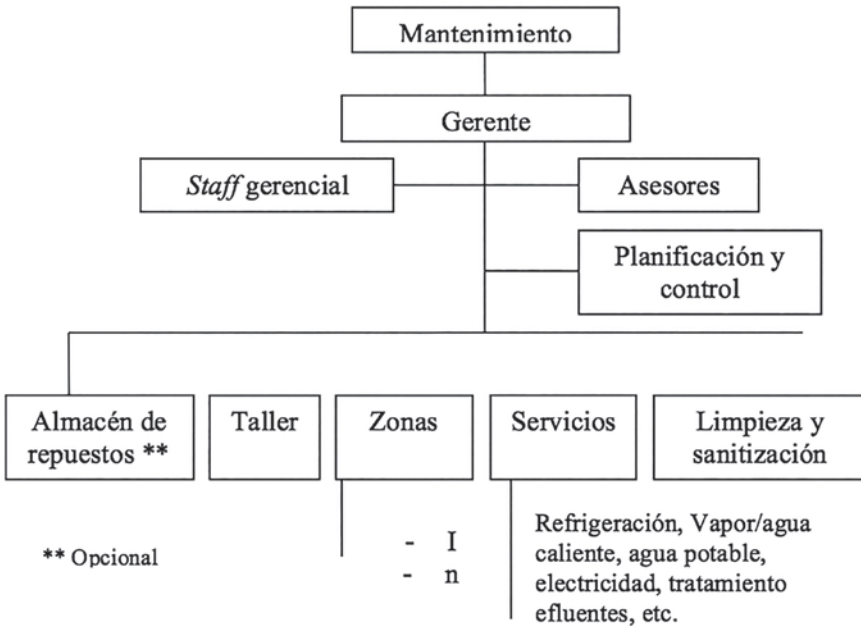


Figura 33. Organigrama Depto. de Mtto. Sistema formal descentralizado
Tomado de [2]



2.5. Preguntas de consulta o análisis

- Consulte nombre, ubicación y actividad económica de algunas pequeñas, medianas y grandes empresas del área metropolitana Pereira – Dosquebradas.
- Para el listado previo identifique a qué sector y subsector económico pertenecen.
- Analice los organigramas de las Figuras 24 a 30, e identifique a cuál *layout* de Planta corresponde cada uno de ellos, y probablemente a qué tamaño de empresa.
- En lo posible, indague la ubicación del departamento de Mantenimiento de las empresas consultadas en la primera pregunta del presente numeral; compare, analice y obtenga conclusiones, con respecto a las Figuras 24 a 30.
- En lo posible, indague los organigramas de Mantenimiento de las empresas consultadas en la primera pregunta del presente numeral; compare, analice y obtenga conclusiones con respecto a las Figuras 31 a 33.

2.6. Para reflexionar. Funciones genéricas del Ingeniero y del Tecnólogo de mantenimiento en Colombia

En el medio colombiano, la mayoría de los egresados de los programas de Ingeniería y Tecnología (en especial de Mecánica y afines) poseen perfiles ocupacionales que se pueden resumir como se describe a continuación:

- Administración de empresas y dependencias técnicas
- Planeación y desarrollo de proyectos de ingeniería
- Control técnico-administrativo de departamentos de producción
- Mantenimiento de toda índole
- Planeación, dirección y supervisión de montajes
- Ventas técnicas

Dadas las características (en cuanto a tamaño) de la industria colombiana (ver *numeral 2.2.1*) en la que solo el 0,13% de las compañías corresponden a grandes empresas, y siendo ellas las que regularmente cuentan con departamentos de Ingeniería, diversas estadísticas muestran que no son muchos los profesionales que pueden acceder a cargos de diseño, planeación y desarrollo de proyectos, mientras que la gran mayoría de Ingenieros/Tecnólogos ingresan a laborar a departamentos

de Mantenimiento.

A la luz de lo anterior, una pregunta válida que se debe hacer el estudiante de Ingeniería y Tecnología (afines a Mecánica) que está a punto de culminar su programa de pregrado es ¿Qué me corresponderá hacer si ingreso a un departamento de Mantenimiento? La Tabla 10 presenta un panorama típico de actividades que desarrolla un Ingeniero/Tecnólogo en tal situación.

Respecto de la Tabla 10 hay varias anotaciones:

- Está basada en la partición de tareas básicas de un departamento de mantenimiento propuesta en la tabla 2 (*Capítulo 1*)

La distribución de actividades está pensada para medianas y grandes empresas, en las cuales regularmente el Tecnólogo hace las veces de asistente del Ingeniero, razón por la cual aparecen muchas tareas de campo, de levantamiento de información y de preparación de informes asignadas a este último, mientras que las tareas de análisis de información, toma de decisiones importantes, elaboración de informes gerenciales y su respectiva sustentación le corresponden al Ingeniero.

Tabla 10. Actividades generales desarrolladas por un Ingeniero/Tecnólogo de Mantenimiento

Tarea	Ingeniero	Tecnólogo
Planear sistemas de Mantenimiento a usar y dirigir cambios en ellos	X	
Estudiar existencias y costos de almacén de Mantenimiento y definir políticas al respecto	X	
Preparar presupuestos anuales de Mantenimiento	X	
Asesorar la gerencia en planes de inversión/reposición en maquinaria/equipo	X	
Programar paradas mayores u <i>overhaul</i>	X	
Estudiar indicadores y costos de operación de procesos/máquinas/equipos	X	X
Preparar términos de referencia para compra/cambio de procesos/equipos, conjuntamente con departamentos de ingeniería	X	X
Programar tareas anuales de mantenimiento rutinario	X	X
Levantar información de campo y redactar instructivos de Mantenimiento		X
Levantar planos e información técnica de piezas/procesos		X
Validar existencias de insumos, repuestos, herramientas y realizar los respectivos pedidos		X
Programador de mantenimiento (creación, cierre, retro-alimentación y reprogramación de órdenes de trabajo)	X	X
Ejecución (Instalar, poner a punto, inspeccionar, limpiar, lubricar, cambiar, reparar, modificar, etc.)	X*	X*
Supervisión de ejecución de tareas de Mantenimiento rutinario o en paradas mayores	X	X
Liquidación de nómina y costos de Mantenimiento		X
Interventoría de proyectos y paradas mayores)	X	X
Supervisión de labores de <i>outsourcing</i> , recepción y cotejo de la facturación respectiva		X
Acopio y procesamiento de información para la conformación de indicadores de Mantenimiento		X
Capacitación de personal operativo y administrativo	X	X

X*: Válido regularmente para la operación de equipos especializados, como por ejemplo instrumental médico, equipos para mantenimiento predictivo, etc.

Para el caso de pequeñas empresas, frecuentemente, ocurre que hay un Jefe o responsable de Mantenimiento con carácter de polivalente o “todero”, es decir, todas las tareas (planeación, programación, supervisión, elaboración de informes, etc.) están concentradas en una persona, regularmente la misma que tiene a su cargo el personal operativo (interno o por *outsourcing*).

Respecto de las microempresas, regularmente, el caso es más dramático en la realidad colombiana, donde por cuestiones económicas y de visión no hay un encargado de mantenimiento y casi todo es correctivo (programado o de emergencia), liderado por un operario experto, o directamente por el propietario de la microempresa.

CAPÍTULO TRES

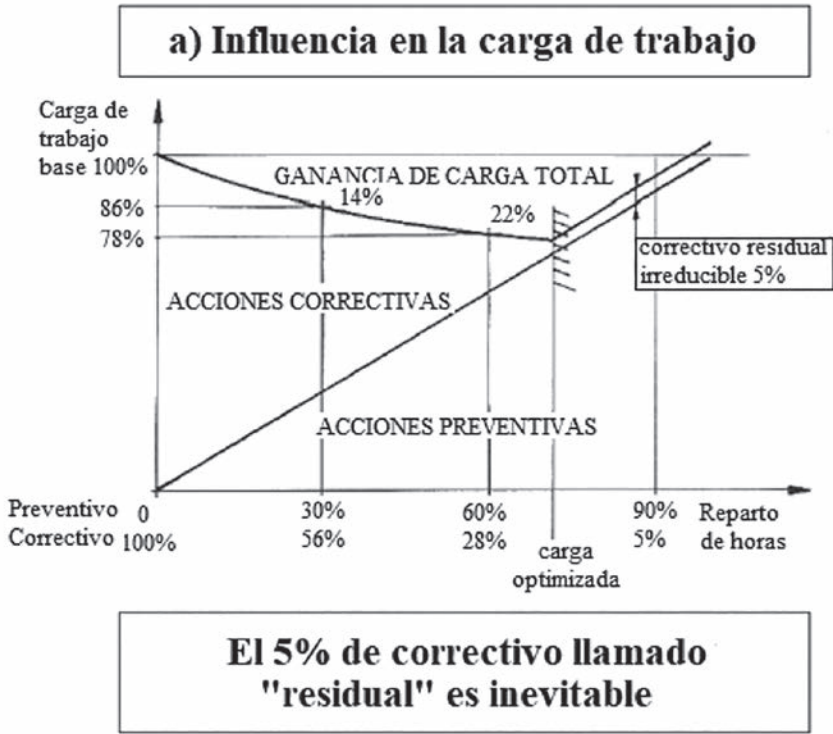
Mantenimiento preventivo (*Preventive Maintenance*)

3.1. Introducción

El Mantenimiento Preventivo es el sistema de Mantenimiento cuyo objetivo esencial es *prevenir* la ocurrencia de fallas en un sistema productivo, con base en la ejecución de unas tareas básicas (Observar, inspeccionar, calibrar, ajustar, cambiar, lubricar, reparar, etc.), a unas frecuencias predeterminadas, asociadas a cada ciclo productivo en particular. La ejecución de las tareas básicas puede indicar la necesidad de realizar tareas programadas adicionales (mantenimiento correctivo programado, modificaciones, *overhaul*, etc.). El Mantenimiento Preventivo es el sistema de Mantenimiento más ampliamente aplicado por las grandes empresas del eje cafetero y del país [10, 11].

La Figura 34 ilustra el comportamiento del Mantenimiento Preventivo, en función del *nivel de rendimiento óptimo* y del tiempo de operación de la máquina/equipo. Las letras V_i corresponden a las *visitas preventivas* periódicas a la máquina/equipo; el ideal es que con base al conocimiento que se tenga del comportamiento y rendimiento de la máquina/equipo (límite de admisibilidad investigado) se efectúe una *parada preventiva* antes de que ocurra un fallo cataléctico; la parada preventiva dura un lapso TA (tiempo de alistamiento), durante el cual se deben efectuar unas tareas programadas y otras emergentes en función de los resultados de las inspecciones (Mantenimiento correctivo programado). Con el pasar del tiempo los Tiempos entre Fallas TBF_i (*Time Between Failure*) se irán acortando, por efectos de inadecuación, obsolescencia e ineficiencia (ver *numeral 1.7*), en otras palabras, el estado real poco a poco se irá alejando del estado teórico o nominal, razón por la cual el estado nominal deberá ser revaluado paulatinamente (Ver *numeral 1.2.2*); los encargados del mantenimiento deberán ir ajustando los TBF_i para que las paradas programadas o *intervenciones preventivas* se realicen antes de que el *nivel de rendimiento* sea igual o inferior al *límite de admisibilidad investigado*, o en términos simples antes de que ocurra una avería mayor o falla funcional.

Figura 34 Ciclo gráfico del Mantenimiento Preventivo Tomado de [6]

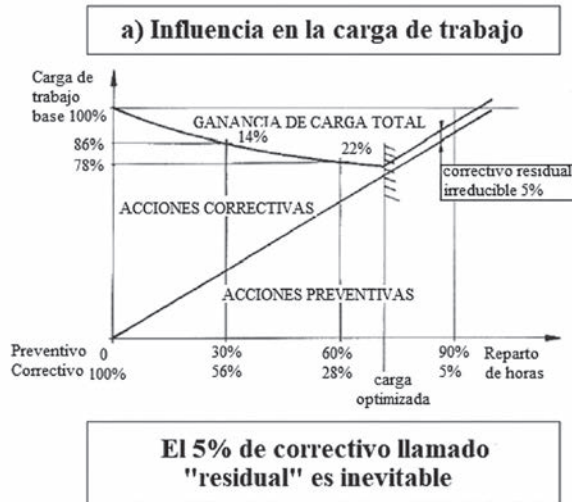


La Figura 35 (a) recuerda que se debe alcanzar un punto de equilibrio entre la Carga de Trabajo de Preventivo y la de Correctivo, llamado *carga optimizada*. A la derecha de la carga optimizada, por mucho más preventivo que se haga, siempre habrá una carga residual (e irreducible) de Mantenimiento Correctivo (que se espera que en lo posible sea correctivo programado).

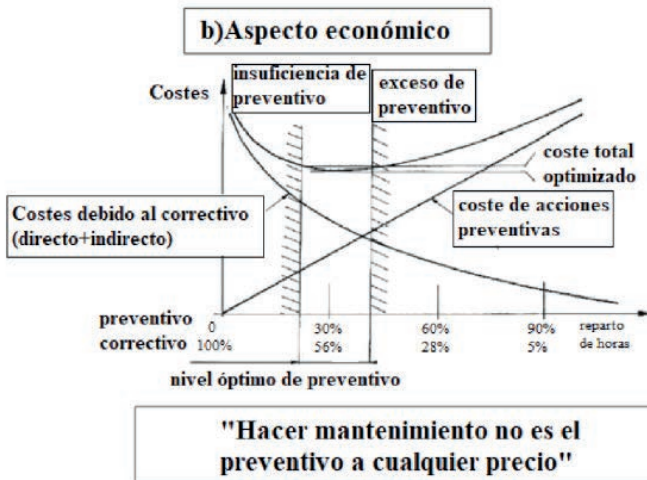
Como se mencionó en la tabla 5 (*numeral 1.5.3*), una de las principales desventajas del Preventivo radica en que se puede llegar fácilmente a excesos en carga de trabajo y obviamente a sobrecostos innecesarios. La Figura 35 (b) refleja esta realidad, la cual es aplicable a muchos otros ámbitos, en el sentido de que “Poco es malo y mucho también”; el anterior adagio aplicado en Mantenimiento Preventivo, indica que hacerlo de manera deficiente (poco o nulo preventivo y mucho correctivo) es muy costoso y hacer Preventivo en exceso es también sumamente costoso, sin que reporte beneficios adicionales. La curva de *Costo Total de Mantenimiento* presenta sus valores más bajos, en los rangos comprendidos entre el (22-42) % de Preventivo y entre el (52-72)% de Correctivo, observándose una relación “ideal” desde el punto

de vista de costos, de 30% de Preventivo y 56% de Correctivo. Por supuesto, estos son rangos generales, hay industrias específicas que requieren mayores o menores cantidades de horas de Preventivo o de Correctivo.

Figura 35. Ciclo gráfico del Mantenimiento Preventivo. (a) Aspecto de carga de trabajo. (b) Aspecto económico Tomado de [6]



Continuación Figura 35. Ciclo gráfico del Mantenimiento Preventivo. (b) Aspecto económico [4]



3.2. Pasos para implementar un plan de mantenimiento preventivo

A continuación, se presenta una metodología general para estructurar un plan de Mantenimiento Preventivo, tomando como punto de partida la situación real muy común “que no hay nada”, o en otras palabras se viene haciendo estrictamente Correctivo. En este contexto surge la siguiente serie de preguntas lógicas mínimas:

¿Sobre qué máquinas/equipos se va a intervenir? ¿Qué tareas se van a hacer?
 ¿Con qué gente / equipos de apoyo / herramientas / insumos / materiales? ¿Cuándo se van a realizar? ¿Cuál es el procedimiento de ejecución? ¿Cuánto duran las tareas?
 ¿Qué formatos van a apoyar la recolección de información, de manera ordenada?
 ¿Cómo se va a medir la efectividad de resultados?

La solución a las anteriores preguntas entrega el orden descrito a continuación:

- Inventario de máquinas, equipos, inmuebles y vehículos que serán cobijados por el plan de mantenimiento.
- Codificación de las máquinas, equipos, inmuebles y vehículos.
- Creación de la Tarjeta Maestra de Datos TMD
- Creación de las Hojas de vida de los equipos
- Relación de requerimientos e instructivos
- Programación de actividades (tablero de control) y balanceo
- Elaboración de las Rutinas Básicas de Mantenimiento RBM
- Definición y creación de formatos de apoyo a la gestión del mantenimiento (TMD, hojas de vida, Órdenes de trabajo, indicadores, etc.)
- Sistematización de la información

3.2.1. Inventario de equipos, inmuebles y vehículos

Se busca con esta tarea elaborar el censo o listado de las máquinas y equipos que serán cobijados en el Programa de mantenimiento, es decir responder la pregunta ¿Sobre qué máquinas/equipos se va a intervenir? Con este inventario se conforma un archivo **Maestro de Máquinas**, debidamente codificado. En este punto es necesario tener en cuenta que este archivo puede ser elaborado en Hoja electrónica (para Micros y pequeñas empresas) o en el módulo respectivo de un Software de Mantenimiento o CMMS (*Computerized Maintenance Management System* (ver numeral 3.2.10), para el caso de las medianas y grandes empresas.

Las personas responsables de elaborar el inventario deben prestarle la atención adecuada, para evitar sub o sobrevaloraciones que podrían llevar a situaciones en

las cuales máquinas/equipos no relevantes queden cobijados por el programa de Mantenimiento, o por el contrario, máquinas/equipos importantes queden fuera de él.

3.2.2. Codificación de los equipos

Una vez que se ha levantado el censo de las diferentes máquinas y equipos que han de ser cobijados por un programa de Mantenimiento, es necesario realizar una **codificación** de estos, es decir, asignar una identificación numérica o alfanumérica, con el fin de que haya una identificación precisa y unívoca de cada uno de ellos. La codificación de la maquinaria y equipo es un asunto propio de cada empresa, y existen diferentes métodos para ello, pasando por diferentes niveles de complejidad, sin embargo, existen unas directrices generales para este proceso:

- Deben permitir una identificación rápida del equipo.
- Deben ser cortos, sencillos y fáciles de desglosar.
- El costo de su implementación debe ser razonable (pintura, adhesivos, placas identificadoras de activo fijo, códigos de barras, etc.).
- La codificación usada debe guardar relación con otros sistemas de codificación de la empresa, particularmente con los códigos contables.

Una forma de realizar la codificación de maquinaria y equipo, es dividiendo una planta o empresa en áreas, secciones, máquinas/equipos, componentes y partes o elementos, teniendo presente el respectivo *Layout* de Planta (Ver *Anexo 1*).

Áreas de Planta: Son procesos en operación o zonas completamente definidas en la Planta, por ejemplo: molienda caña, refinación, transporte, etc.

Sección o grupo: Son conjuntos de máquinas/equipos que materializan un proceso dentro de un área específica, por ejemplo: torres de destilación, torres de enfriamiento, hornos, generación de vapor, etc.

Máquina/Equipo: Recurso físico que hace parte de una sección, tales como unidad compresora, sistema de bombeo, banda transportadora, torno, inyectora de plástico, etc.

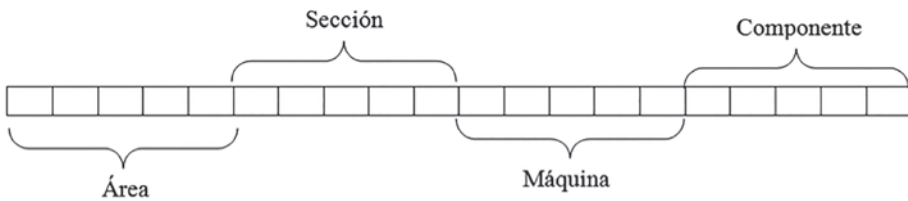
Componente: Son partes de una máquina/equipo, que a su vez están formadas por elementos, pero que individualmente no pueden ser consideradas como un equipo. Ejemplo, motores eléctricos, motores hidráulicos, reductores de velocidad,

actuadores (cilindros hidráulicos y neumáticos), válvulas, etc.

Parte o elemento: cada una de las subdivisiones de un componente, por ejemplo: tornillería, sellos, rodamientos, etc.

Seguidamente se presenta un ejemplo de directriz de codificación de máquinas/equipos, aplicable a una gran empresa (Figura 36).

Figura 36. Directriz de codificación para una gran empresa



Para Área : (2) caracteres alfabéticos y (3) numéricos
Para sección : “ ”

Para Área : (2) caracteres alfabéticos y (3) numéricos

Para sección : “ ”

Para máquina : 1er dígito. Indica *clase* de máquina
 2º dígito. Indica el *tipo* dentro de la *clase*. 1
 3º, 4º y 5º dígito. Indican el consecutivo.

Para componente : (1) carácter alfabético y (3) numéricos.

Como un complemento adicional, se puede llegar al nivel de **parte o repuesto**, en cuyo caso, regularmente, se utiliza una serie predefinida de números.

Tomando como base la directriz anterior, se presenta un ejemplo de codificación, aplicado a una planta cementera: Planta Cementera, Área de molienda de materia prima (puzolana, yeso y mineral de hierro), Dosificación de materia prima (por peso), banda-báscula, reductor de velocidad.

Área : **SI 100** Molienda materia prima
 Sección : **SS 100** Dosificación materia prima

Equipo : **01 001** Banda-báscula arena
0: Bandas transportadoras **1:** con báscula **001:** consecutivo
Componente: **R-001** **R:** Reductor de velocidad **001:** Consecutivo.

Una vez hecha la codificación de maquinaria y equipos es posible:

- Recopilar datos e información acerca de las labores de Mantenimiento, asociándolas a un equipo en particular, a una familia de equipos, a una sección o a un área.
- Con la ayuda de software contable y de Mantenimiento es posible establecer el coste del mantenimiento (Mano de obra y repuestos), bien sea por máquina/equipo, por familias de máquinas/equipos, por secciones, por áreas, etc.
- Enlazar de manera clara las políticas y estrategias de Mantenimiento, con máquinas/equipos plenamente identificados física y contablemente.
- Realizar traslados de máquinas/equipos entre áreas, secciones o sucursales, reduciendo los traumatismos operativos y contables.

3.2.3. Creación de la Tarjeta Maestra de Datos TMD, para cada máquina/equipo

Una TMD es un formato donde se consigna información general y específica de una máquina/equipo/proceso, tales como su identificación, información comercial de vendedor y representante, capacidades de trabajo, condiciones operativas y especificaciones técnicas de los componentes principales.

No hay un formato estandarizado para las TMD; sin embargo, su diseño debe contener la información suficiente para conocer de manera rápida y sencilla la máquina/equipo/proceso. Un modelo de Tarjeta Maestra de datos puede constar de:

- Información general de la empresa. Nombre. Identificación ISO 9000 del formato (código, fecha modificación).
- Características generales de la máquina/equipo. Se menciona la información básica de la maquina como *código de activo fijo*, nombre, marca, modelo, serie, año de fabricación, año de instalación, código ó número de catálogo, fotografía (opcional), etc.

- Información comercial. Hace referencia a la información necesaria para ubicar el proveedor y al representante comercial, en el país o en la ciudad (país y ciudad de origen, razón social empresa, dirección, teléfono, e-mail, página web, n° de pedido).

Este tipo de información tiene como propósito el tener disponible un contacto vigente para solicitud de garantías, de catálogos, de repuestos, de servicio técnico, consultas operativas, etc.

- Características operativas. Corresponden a información sobre las dimensiones principales, especificaciones y condiciones de trabajo de la máquina/equipo. Dentro de dimensiones principales se tiene longitud, altura, profundidad y el peso bruto. Las especificaciones y condiciones de trabajo informan la capacidad productiva del equipo, la criticidad del equipo en el proceso productivo, los turnos de trabajo, los servicios que requiere para poder operar (electricidad, vapor, aire comprimido, etc.).

Es importante resaltar que a cualquier máquina/equipo siempre será posible definirle su capacidad productiva o de trabajo, en variables de ingeniería. Ejemplos: flujos volumétricos o másicos, flujos de calor, fuerzas aplicadas y sobre qué área, piezas/hora, recorridos, etc. En lo concerniente a servicios requeridos por la máquina/equipo también es necesario y conveniente definirlos en función de variables de ingeniería, como por ejemplo corrientes, tensiones, flujo de vapor con la presión y temperaturas asociados, presión y flujo de aire, etc.

- Características de los componentes principales. Da cuenta de los reductores, bombas, ventiladores, actuadores, etc., (y de sus especificaciones principales), vitales para la operación de la máquina/equipo. Este apartado es importante para la solicitud de reposiciones (refacciones) y de unidades de repuesto. Dado que muchas máquinas poseen componentes genéricos, el disponer de una relación de este tipo de componentes ayudará posteriormente a identificar la estandarización e intercambiabilidad de componentes y partes, con el fin de reducir el número de unidades de repuesto.

La Figura 37 ilustra una tarjeta maestra de datos correspondiente a una banda transportadora.

Es necesario aclarar que en los casos de secciones o grupos (*numeral 3.2.2*) que materializan un producto, por ejemplo, una línea de corte longitudinal o *Slitter* en una fábrica de tubos o láminas a medida, se suele elaborar una *TMD principal* para la sección o grupo de máquinas (vistas como un todo), y luego se elaboran *TMD auxiliares* para cada una de las máquinas/equipos de la línea. Las *TMD auxiliares* son

invocadas o referenciadas en la parte correspondiente a componentes principales de la *TMD principal*.

Figura 37. Tarjeta Maestra de Datos de banda transportadora
Tomado de [20]

 <p>COOPERATIVA DE CAFICULTORES DE MANIZALES</p>	DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO TARJETA MAESTRA		FECHA: VERSION: 01
	EQUIPO: Banda transportadora		CODIGO: BT01
MARCA: <i>Pinhalense S.A.</i>		TIPO: Mecánico	
MODELO: TR1		SERIE: 15	
ACCIONAMIENTO: Eléctrico – Mecánico		CONEXION: 3 Fases	
CAPACIDAD DE TRABAJO: 18 Ton C.P.H /h			
LARGO: 3050mm ANCHO: 520 mm ALTO: 20 mm PESO: 2000kg.			
FABRICANTE: <i>Pinhalense SA</i> DIRECCIÓN: Rua Honorio Soares, 80 – CEP 13990-000 Espírito Santo Do pinhal – SP Brasil AÑO DE FABRICACIÓN: 2005		REPRESENTANTE: Omer De Jesús Gonzáles DIRECCIÓN: Calle 5ª N° 14-29 Manizales-Caldas TEL: (68) 891778 CEL: 3108222691	
1. TURNO	2. TURNOS	3. TURNOS	INTERMITENTE X CRÍTICO X
Nota: 3Turnos en época de cosecha			
SERVICIOS PARA OPERACIÓN			
Electricidad: Tensión: 220V 3φ; Corriente: 6,12 A; Potencia:1,5 kWh			

3.2.4. Creación de las Hojas de Vida de máquinas/equipos

Respecto de la hoja de vida hay dos visiones, dependiendo de la empresa y de cómo manejen la información.

Visión completa. La Hoja de Vida es la carpeta que contiene toda la información de la máquina/equipo, referente a Tarjeta maestra de datos, Relación de requerimientos, Instructivos de mantenimiento, cronogramas de actividades,

Rutinas básicas de mantenimiento RBM, catálogos de partes y de servicio, listados de repuestos, planos y por último el *Historial de mantenimiento*. Este es el “debiera”, es decir que de manera centralizada y ordenada se disponga de la información completa de la máquina/equipo.

Visión simple. En muchas pequeñas y microempresas la cultura de manejo de la información es muy pobre y la Hoja de Vida se limita a un *Historial de Mantenimiento*.

El *Historial de Mantenimiento* es un formato (símil de la Historia clínica de un paciente) donde se consignan en orden cronológico las reparaciones y modificaciones importantes hechas a la máquina. El *Historial de Mantenimiento* puede estar en copia dura o archivo electrónico. La tabla 11 ilustra un modelo básico de un Historial de Mantenimiento.

Tabla 11. Modelo básico de Historial de Mantenimiento

Ítem	Fecha	Descripción	Repuestos e insumos	Observaciones

Es importante aclarar que en el *Historial de Mantenimiento* regularmente no se consigna la información correspondiente a mantenimientos rutinarios (limpiezas, lubricaciones periódicas, refacciones menores, etc.), exceptuando casos especiales. Un cambio de aceite y filtros de un motor diesel no se consigna regularmente en el *Historial de Mantenimiento*, pero si por ejemplo, ocurrió un daño de la empaquetadura de la bomba de agua con lo cual se contaminó el aceite (por emulsión), se hace entonces necesario el recambio de empaques (de la bomba), aceite y filtros (del motor), y en este caso sí es pertinente hacer la anotación en la Hoja de Vida. En muchas situaciones reales se presenta el caso que no hay memoria escrita al momento de elaborar el plan de mantenimiento preventivo, por lo cual es necesario acudir a la memoria colectiva e individual de los ejecutantes, personas que pueden ayudar a recordar sucesos importantes relacionados con refacciones importantes y *overhaul*.

En las grandes empresas que poseen CMMS (ver numeral 3.2.10) embebidos en software corporativos, estilan diligenciar en el Historial de mantenimiento solo el número de la orden de trabajo OT (ver numeral 3.2.9) y el *vale de salida de almacén* (Documento que referencia los elementos consumidos del Almacén para una cierta OT), para referenciar los Mantenimiento rutinarios, con el objetivo de no atiborrar el Historial con información no relevante, y solo en el caso de reparaciones mayores o modificaciones amplían la descripci

3.2.5. Relación de requerimientos de Mantenimiento

Este numeral busca definir las actividades o tareas que se efectuarán sobre las máquinas/equipos cobijados por el Plan de Mantenimiento, o en otras palabras, responder la pregunta ¿Qué tareas se van a hacer?

Con base en el estudio y conocimiento de los procesos/máquinas/equipos debe elaborarse un listado de actividades de mantenimiento requeridos por cada máquina/equipo, asociadas a una frecuencia propia del proceso (horas de servicio, distancia recorrida, unidades producidas, etc.). A este listado también suele llamarse *Maestro de Actividades*.

Las fuentes principales de información para conformar el Listado de requerimientos son:

- Manuales de servicio
- La internet
- Información disponible en asociaciones gremiales (por ejemplo, Asocaña, Fedemetal, ACIEM)
- Consultas con colegas que laboren en otras empresas del mismo gremio.
- Catálogos de partes
- Conocimiento y experticia del personal

Una forma usual de subdividir las tareas de Mantenimiento Preventivo es clasificándolas en los siguientes grupos genéricos:

Lubricación

Electricidad

Mecánica

Instrumentación

Una vez clasificadas las tareas en estos subgrupos, se les asigna un consecutivo (L01 a Lxy), lo que arroja el nombre genérico de Requerimientos **LEMI** o **LEM**, y es usual escuchar el nombre de Mantenimiento Preventivo o Mantenimiento LEMI.

3.2.6. Instructivos de Mantenimiento

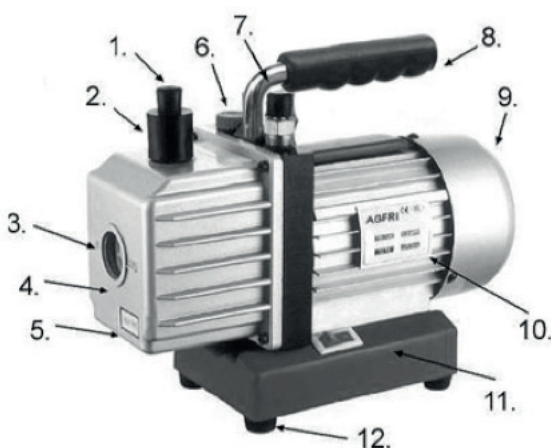
También llamados *Estándares* o *Protocolos* son documentos (copia dura o digitales) en los que se consigna la información necesaria para la ejecución física de cada requerimiento de mantenimiento, es decir, nombre y código de la máquina, nombre y código del instructivo, medidas de seguridad, materiales e insumos necesarios, herramientas necesarias, procedimiento de ejecución, y tiempo estimado de ejecución. Básicamente, los instructivos de Mantenimiento responden a las preguntas: ¿Con qué gente / equipos de apoyo / herramientas / insumos / materiales

se hará la intervención de Mantenimiento? y ¿Cuánto duran las tareas?

Los instructivos se pueden dividir en *genéricos* y *específicos*. Los instructivos *genéricos* describen procedimientos generales que se pueden aplicar de manera similar en distintas máquinas/equipos, mientras que los instructivos *específicos* por su parte se aplican a mecanismos o partes de máquinas que o son “únicos” (por complejidad, por tamaño, por reglaje específico, etc.) o difícilmente se encontrarán en otras secciones de la planta o fábrica, por ejemplo “*ajuste del gap de los mantos de un hidro-cono* (en la industria minera)”. Un ejemplo de un instructivo genérico se describirá seguidamente.

Muchas máquinas y equipos poseen un cárter o depósito de aceite (elemento 4, Figura 38). Para inspeccionar el nivel de aceite del cárter, sin retirar el separador aceite – aire (elemento 2, Figura 38), se hace uso de una mirilla de vidrio (elemento 3, Figura 38). El instructivo genérico para este procedimiento se podría llamar *L-01 Revisión de nivel de aceite*, y consistiría básicamente en: *inspeccionar visualmente el nivel en la mirilla. Completar en caso de ser necesario...* El mismo código L-01 se aplicará para todas las máquinas/equipos que posean cárter, sin necesidad de crear nuevos instructivos que sobrecarguen al sistema de información. Cuando se presentan instructivos genéricos, no son asignados a una máquina/equipo en particular, sino que quedan disponibles para invocarlos o referenciarlos en las diferentes máquinas/equipos en que serán aplicados.

Figura 38. Depósito y mirilla del nivel de aceite Tomado de [21]



Los Instructivos de mantenimiento cumplen varias funciones:

- Plasman por escrito parte de la experticia que adquieren los ejecutantes, evitando que hayan “empleados indispensables”.
- Documentan los procedimientos y sirven de respaldo para los círculos de calidad.
- Realimentan inquietudes, observaciones, tiempos, etc., propios de la ejecución física de las tareas de mantenimiento.

Para ilustrar un poco lo concerniente a listado de requerimientos y redacción de un Instructivo de mantenimiento, se tomará como objeto de estudio el compresor de pistón (de acople directo) mostrado en la Figura 39. Este equipo es posible dividirlo en los siguientes subsistemas:

- Estructura y depósito - Grupo motor
- Grupo compresor - Instrumentación

Figura 39. Compresor alternativo de acople directo Tomado de [22]



Un listado básico de tareas (con sus respectivas frecuencias) a efectuarle al compresor es el descrito en la Tabla 12, y a cada tarea le debe corresponder luego su respectivo Instructivo.

Tabla 12. Listado de requerimientos para compresor de pistón

Subsistema	Tareas diarias	Tareas mensuales	Tareas semestrales
Estructura y depósito	Drenar el agua del depósito		Chequear estado de la estructura en busca de fisuras y tornillería suelta o faltante
Grupo motor			Mantenimiento eléctrico a bormera y guardamotor
Grupo compresor	Chequear el nivel de aceite del cárter	Limpieza de filtro de aire	Cambio de aceite y filtros
Instrumentación		Verificar estado del manómetro	- Chequear la correcta operación del presóstato. - Verificar la correcta operación de la válvula de seguridad

Ahora bien, el Instructivo correspondiente a la tarea **Cambio de aceite y filtros** es el siguiente:

L 06. Cambio de aceite y filtros a compresor de pistón

Recomendaciones

- Preferiblemente, poner en operación el compresor por un lapso de 5 minutos, antes de ejecutar el instructivo, con el fin de que la suciedad del aceite fluya fácilmente al momento de drenarlo.
- Tener en cuenta el programa RESPEL de la empresa, en lo concerniente a disposición de residuos.

Medidas de seguridad.

- Apagar la máquina y desconectar la fuente de alimentación.

Material necesario.

Embudo mediano

Aceite SAE 50, cantidad: 1 gal

Estopa

Recipiente de 1gal (para recoger el aceite usado)

Filtro LPA 001, cantidad: 1 unidad

Herramientas necesarias.

Llave boca fija o estría, de 14mm.

Procedimiento

Limpiar externamente el cárter con la estopa. Utilizando la llave boca fija retirar el tapón de llenado del cárter, colocarlo a un lado de la máquina.

Ubicar el recipiente para aceite usado justo abajo del tapón de drenaje, y con la llave boca fija retirar el tapón de drenaje para que fluya el aceite sucio.

Mientras drena el aceite sucio, remover la tapa del porta-filtro (desenroscar tuerca mariposa) y retirar el filtro viejo, limpiar cuidadosamente el porta-filtro, instalar el filtro nuevo y asegurar nuevamente la tapa.

Una vez que haya drenado todo el aceite sucio, instalar nuevamente el tapón de drenaje y aplicar el aceite nuevo. Instalar el tapón de llenado. Verificar el correcto nivel en la mirilla.

Energizar nuevamente el compresor, ponerlo en funcionamiento validando su correcta operación.

Disponer el aceite y filtro usados en los sitios indicados por el RESPEL. Retirar herramientas y dejar el sitio limpio y ordenado.

Tiempo estimado de ejecución: 30 minutos.

Si en un Instructivo de Mantenimiento el procedimiento a ilustrar es muy complejo, es usual que haya apoyo gráfico de fotografías o imágenes del procedimiento, sobre las cuales se realizan indicaciones de ajustes, identificación de puntos específicos, etc. Aprovechando las posibilidades que ofrece la realidad aumentada RA, es posible disponer y utilizar videos y tutoriales para facilitar la comprensión, preparación y ejecución de la tarea a efectuar.

3.2.7. Programación (Tablero de Control)

En este numeral la pregunta a responder es ¿Cuándo se van a realizar las tareas LEMI? Esta pregunta se responde con la elaboración de los **Cronogramas de Mantenimiento o Tableros de control**, los cuales indican a los planeadores y ejecutantes del mantenimiento el momento preciso en que se deben llevar a cabo las labores de Mantenimiento. La indicación de la ejecución física de la labor se lleva

a cabo generando una *Orden de Trabajo* (ver numeral 3.2.9). Un *Tablero de control* debe ir acompañado de un mecanismo para su administración, es decir, alimentación de horómetros, contadores de producción, odómetros, etc.), de tal forma que haya control de cuándo se hizo la última tarea y cuándo será la próxima (ver numerales 3.2.9 y 3.2.11)

Los *Tableros de control* o *Cronogramas de mantenimiento* se pueden elaborar en medio físico (cartelera) o digital (software de mantenimiento), y una vez definidos es necesario hacerles un *balanceo* (ver Capítulo 13), para evitar que haya semanas sobrecargadas de trabajo, y otras desocupadas.

La elaboración de los *Tableros de control*, puede estar basada en las siguientes variables, dependiendo del tipo de industria en estudio:

- Por tiempo transcurrido
- Por horas reales de servicio trabajadas o distancias recorridas.
- Por unidades producidas u otras variables

Tableros de control por tiempo transcurrido. Se aplican en empresas que trabajan por turnos (regularmente de ocho horas) y el ritmo de producción es aproximadamente constante. Basado en este panorama se definen unas frecuencias de ejecución que pueden ser diarias, semanales, trimestrales, anuales. Correspondientemente con las frecuencias anteriores aparecen *Tableros de control diario y anual*.

Los *Tableros de control diarios* (Tabla 13) se elaboran para un lapso de una semana y en ellos se consignan las actividades que deben ejecutarse todos los días o en lapsos inferiores a una semana. Cabe resaltar que el Instructivo L - 01 es común a las tres máquinas presentadas, lo que indica que se trata de un instructivo genérico (ver numeral 3.2.6). Algunas empresas estilan elaborar *Protocolos* o *Rutas diarias* de Mantenimiento (ver numeral 3.2.8), a cambio de elaborar los *Tableros de control diarios*.

Tabla 13. Tablero de control diario. Tomado de [1]

Código	Máquina	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Mn01	Manejadora	L - 01	L - 01	L - 01	L - 01	L - 01	L - 01
			L - 02		L - 02		L - 02
		E - 01		E - 01		E - 01	
Ev 01	Evaporadora	L - 01	L - 01	L - 01	L - 01	L - 01	L - 01
Cn 01	Condensadora	L - 01	L - 01	L - 01	L - 01	L - 01	L - 01
		M - 22			M - 22		

Los *Tableros de control anuales* (Tabla 14) se elaboran para un período de un año, subdividiéndolos en 52 semanas (un año comercial) y en ellos se consignan las actividades que deben ejecutarse por períodos semanales o múltiplos de ellas.

Tabla 14. Tablero de control anual Tomado de [1]

Código	Semanas	1	2	3	4	51	52
	Máquinas							
Mn01	Manejadora	L - 01	E - 17	L - 02	L - 10		L - 01	M - 15
		L - 12		E - 23			L - 12	
		M - 15						
Ev 01	Evaporadora	L - 02	E - 25	L - 16	E - 10		L - 02	E - 26
		L - 15	M - 17	M - 11			L - 10	M - 18
Cn 01	Condensadora	L - 01	E - 15	E - 18	M - 10		L - 01	M - 22
		M - 22					M - 20	E - 31

Con los *Tableros de control por tiempo transcurrido* es necesario ser cuidadoso en los casos, en que haya incremento o reducción de turnos, con respecto al ritmo de trabajo normal, para no ejecutar mantenimiento en exceso o en defecto, puesto que en ambos casos habrá pérdidas y despilfarros.

Tableros de control por horas reales de servicio trabajadas o distancias recorridas. Este tipo de tableros de control se aplica mucho en el área automovilística, para equipo minero, equipos fuera de carretera (maquinaria amarilla o sector maderero, por ejemplo), industria de la construcción, entre otros; en los casos anteriores importa ¿Cuánto tiempo el equipo estuvo en operación (la distancia recorrida es muy corta)? o ¿Cuánta distancia recorrió el equipo (sin importar mucho la carga movilizada)? En ambos casos se hace necesario dotar los equipos de medidores de tiempo (horómetros como se les llama normalmente en la industria) o de cuentakilómetros (Odómetros). Con este tipo de tableros de control se racionalizan mejor los recursos de mantenimiento empleados (y el lucro cesante de producción), en relación con los *Tableros de control por tiempo transcurrido*. La tabla 15 presenta un fragmento de un *Tablero de control por horas reales de servicio laboradas*.

Tableros de control por unidades producidas. Entre otras, se aplican en industrias como la metalmecánica y la petroquímica, donde es posible establecer contadores de producción, bien sea discreta o continua. Al igual que con los tableros de control por horas reales de servicio laboradas, se racionalizan mejor los recursos de mantenimiento empleados (y el lucro cesante de producción), en relación con los *Tableros de control por tiempo transcurrido*.

Tabla 15. Fragmento de Tablero de control por horas reales trabajadas
Tomado de [20]

Actividad y Horas de Servicio	16	24	64	160	200
Código equipo					
(G01-SA01 hasta G08-SA08), O01-SA09					M04
(G01-EH01 hasta G08-EH08), (O01-EH09)	M07				M04
(G01-H01 hasta G08-H08), (O01-H09)			M11,M12		
G01-TR01		L04			M04
(G02-TR02 hasta G08-TR08)		L04			M04

3.2.8 Rutinas básicas de Mantenimiento RBM

Las **Rutinas Básicas de Mantenimiento RBM**, constituyen un conjunto de tareas de Lubricación, Electricidad, Mecánica e Instrumentación, definidas en formatos estandarizados, que deben ser ejecutadas por un(os) operario(s), siguiendo una determinada *ruta lógica* dentro de la planta, sus áreas, las máquinas y al interior de estos, reduciendo el desperdicio de tiempo y recursos durante los traslados de los ejecutantes. Las RBM no deben confundirse con una lista de chequeo (*check list*) de operación o mantenimiento, en la cual básicamente se verifica el cumplimiento o no de unas determinadas condiciones operativas y de seguridad, previo al inicio de operación, o posterior a ella.

Para aclarar la intención de las RBM obsérvese el fragmento del Tablero de control mostrado en la Tabla 15, en la frecuencia correspondiente a 200 horas; el instructivo M-04 se le debe efectuar a veintiséis máquinas, distribuidas en cuatro secciones diferentes de la planta. Supóngase que una sola cuadrilla se encargará de ejecutar la tarea M-04, y que iniciará en la primera sección de la planta; podría ser que iniciaran con **G01-SA01** y continuaran consecutivamente hasta llegar a **G08-SA08**, seguidamente intervendrían **O01-SA09**; en este punto se ha culminado la primera sección, la pregunta sería ahora ¿cuál es la sección más cercana a la primera? La que sea, hasta allí se deberá trasladar el personal con sus herramientas e insumos, reduciendo distancias y tiempos, y así hasta culminar la tarea. El orden lógico de ejecución de este grupo de tareas deberá estar plasmado en una RBM.

Las frecuencias de las RBM por lo regular son: diarias, semanales, quincenales, mensuales, pero también pueden estar regidas por horas reales trabajadas y unidades producidas.

¿Quiénes y cuántos operarios ejecuten las RBM? depende entre otros aspectos de:

- El *layout* de planta y el tamaño de la empresa. Producción continua o discreta, una sola línea de producción o varias repartidas en diferentes áreas o secciones (ver **Anexo I**), cantidad de máquinas/equipos, complejidad de los equipos, etc.
- El tiempo programable para Mantenimiento TPPM (ver *Capítulo 13*). Antes de iniciar la jornada, entre turnos, en las noches, al finalizar la jornada, entre cambios de referencia, etc.
- El nivel de especialización de los operarios. Puede ser ejecutada por operarios “toderos”, mecánicos, electricistas, lubricadores, instrumentistas, etc.
- El tipo de contratación. Personal propio o subcontratado (*outsourcing*).

El tipo de tareas que se ejecutan en una RBM son:

- Inspección y monitoreo de condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa)
- Limpieza externa e interna de la máquina/equipo
- Inspección externa e interna del equipo (visual, al tacto, auditiva o con instrumentación). Se deben ubicar partes sueltas, faltantes, rotas, fatigadas, defectuosas, fugas en mangueras, racores, tuberías, sobrecalentamiento, corrosión, desgaste, vibración, etc.
- Lubricación y engrase
- Reemplazo de partes o componentes. Los reemplazos pueden haber sido previamente programados o ser el resultado de las inspecciones internas o externas previas
- Ajuste y calibración. Puede ser necesario poner en marcha el equipo o no. Puede ser de naturaleza mecánica, eléctrica, electrónica, etc. Debe hacerse con base a normas, estándares o procedimientos preestablecidos.
- Revisión de seguridad eléctrica (paros de emergencia, finales de carrera, interruptores de seguridad, etc.)
- Pruebas de operación del equipo. Procedimiento que se debe realizar una vez ejecutadas las tareas anteriores, en lo posible en compañía del operario del equipo.

¿De dónde sale la directriz de las tareas a ejecutar en una RBM?

- Recomendaciones del fabricante
- Listado de requerimientos LEMI
- Cronogramas de actividades

¿Qué información básica debe llevar el formato de RBM?

Código RBM, consecutivo u orden de ejecución (dentro de la máquina/equipo, dentro de la sección y dentro de las áreas de la Planta), parte o mecanismo a monitorear, insumos o materiales, tiempo estimado, instructivo de mantenimiento asociado (si es necesario).

Ejemplo RBM para una planta hormigonera

A continuación, se desarrollará una RBM para una planta hormigonera del tipo Dosificadora. En primer término (al igual que en la realidad) se debe tener la comprensión básica del funcionamiento y operación de la planta y de sus máquinas/equipos. La Figura 40 presenta una panorámica de esta y la Figura 41 muestra su distribución en planta que corresponde a un *flow Shop* (*Anexo 1*). El nombre de *dosificadora* se debe a que la planta mide (por peso y volumen) cada uno de los materiales y los entrega luego al camión hormigonero o *mixer*, quien finalmente los mezcla, dándole la apariencia y consistencia final del concreto. La Figura 42 corresponde a una vista del *Catálogo de partes* de la planta en mención.

Operación simplificada Planta:

Concreto. Material compuesto utilizado ampliamente en la industria de la construcción, obtenido por la mezcla de arena y gravas (áridos), agua, cemento y aditivos (sustancias químicas que le confieren diferentes propiedades). El concreto se especifica en función de su resistencia a la compresión (medida en PSI o MPa) que exhibe una probeta tipo, a los 28 días de haber sido elaborado. Las dosificaciones de cada uno de sus componentes definen la resistencia final a la compresión, por lo tanto, es obvio que durante el proceso de fabricación es vital el control (por peso principalmente) de cada una de las cantidades.

Figura 40. Vista panorámica de una Planta Hormigonera dosificadora
Tomada de [23]



La siguiente explicación de funcionamiento está basada en las Figuras 40, 41 y 42. Un cargador (equipo móvil fuera de carretera) toma material de las pilas de grava 1, grava 2 o arena (uno a la vez) y lo deposita en la tolva de alimentación de compartimentos (no visible en la Figura 42); por gravedad el material dentro de la tolva cae a la *banda principal* (Figuras 40 y 41), siendo transportado hasta llegar a la tornamesa (*Turnhead chute*, numeral 5 Figura 42), el cual lo direcciona a un compartimento en particular del depósito principal de agregados (*Aggregate bin*, numeral 6 Figura 42), este compartimento almacena por separado los materiales, es decir, no debe permitir mezcla de áridos antes del pesaje.

Los silos o depósitos de cemento 1 y 2 (*Cement silo* y *auxiliar silo*, numeral 2 Figura 42), contienen el cemento a granel antes de su dosificación por peso en la báscula de cemento (*Cement batcher*, numeral 4 Figura 42); para llevar el cemento de los silos a la báscula de cemento se emplea la caída por gravedad (en el caso del *cement silo*) o con la ayuda de un transportador de tornillo sinfín (*Aux. screw conveyor*, numeral 3 Figura 42), en el caso del *auxiliar silo*. Para la dosificación de los áridos se hace uso de la báscula de agregados (*Aggregate batcher*, numeral 7 Figura 42); el proceso de pesaje en esta báscula se hace de a un material a la vez para garantizar la dosificación requerida, haciendo uso de unas compuertas accionadas con cilindros neumáticos; una vez que los áridos han sido pesados son descargados a la banda transportadora o banda mixer (*Conveyor*, numeral 12 Figura 42) que los lleva al camión hormigonero o *mixer* (Figura 40). El principio de operación de las básculas

de cemento y agregados es por *Stress gauge* (celda de carga o deformómetros). El agua requerida para la fabricación del concreto se supe regularmente del acueducto, su paso o no se controla con una electroválvula y el conteo se lleva a cabo con un cuenta-litros (medidor de caudal por turbina). Por último, la dosificación de los aditivos se hace con otro cuenta-litros.

En un proceso de cargue normal, la mixer vacía ubica su tambor (*Drum*) justo debajo del *shut* de descarga del *Conveyor* y lo pone en rotación; desde una caseta de operación (que no se aprecia en las Figuras) y haciendo uso de un PC + software + PLC, se envía una tarea a la Planta, para que en automático y de acuerdo a secuencias y cantidades preestablecidas (recetas) comience a pesar la grava 1, la grava 2 y la arena en la *báscula de agregados* 7 y simultáneamente, pesa el cemento requerido en la *báscula de cemento* 4. Una vez pesados los áridos y el cemento, comienzan a ser descargados al transportador o *Conveyor* 12, el cual los traslada al *mixer*. La cantidad de agua y aditivos son controlados por electroválvulas y cuenta-litros y descargados a través de una tubería directamente al camión.

Como se dijo previamente, la planta *dosifica*, mientras que el tambor del camión rota y *mezcla* los componentes, en un lapso comprendido entre (3 – 8) minutos, hasta dar la consistencia final quedando listo para ser transportado y descargado en la obra.

Como resultado del conocimiento de la planta, de su operación, de las necesidades de mantenimiento se ha elaborado la siguiente RBM diaria de la Planta Dosificadora:

RBM diaria Planta dosificadora

Planta eléctrica de respaldo

- Revisar nivel de aceite del motor.
- Revisar nivel de agua en el radiador.
- Revisar nivel del depósito de combustible.

Banda principal y Conveyor (Banda Mixer)

- Verificar estado de la banda transportadora.
- Revisar tornillería rota, suelta o faltante

Con el equipo en operación

- Verificar alineación y tensión de la banda. Corregir si es necesario.

Compresor

Antes de ponerlo en marcha:

- Revisar nivel de aceite del compresor, completar si es necesario.
- Revisar nivel de aceite del vaso lubricador de la unidad de Mantenimiento. Completar si es necesario.
- Drenar el agua del tanque.

Una vez que la unidad haya cargado:

- Inspeccionar que el manómetro del tanque y la unidad de mantenimiento estén registrando la lectura adecuada (6 bar o 90 PSI aprox.) En caso contrario identificar la causa y corregir.
- Verificar que no haya fugas en la unidad de Mantenimiento, mangueras y racores.

Tolvas de agregados

- Verificar durante la operación de la planta que las compuertas no dejen escapar material. Corregir de ser necesario.

La ejecución de este orden de operaciones está planteada para una planta dosificadora de producción pequeña (60 a 80 m³/hora de concreto), en la cual un ejecutante polivalente o “todero” hace todas las tareas LEMI, es decir, un caso típico de micro y pequeña empresa colombiana (ver Capítulo 2).

Figura 41. Distribución en Planta Flow Shop de una Planta Hormigonera dosificadora

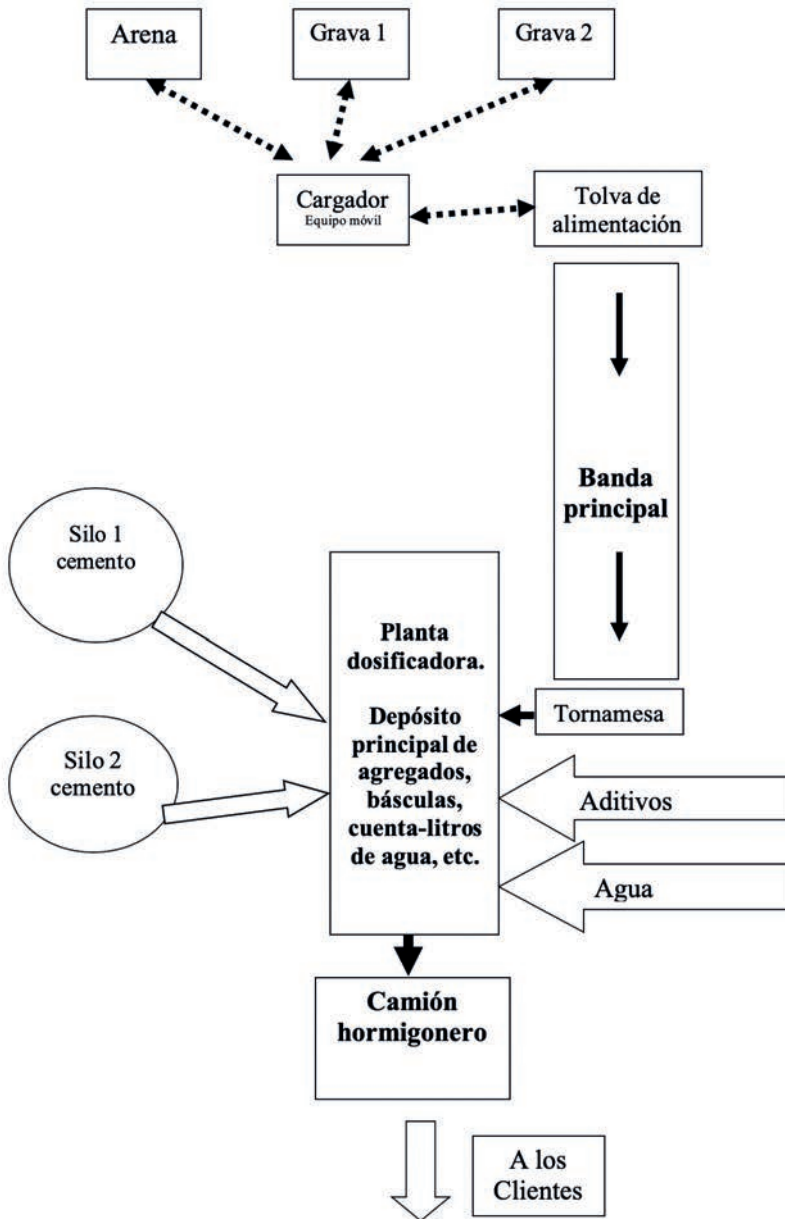
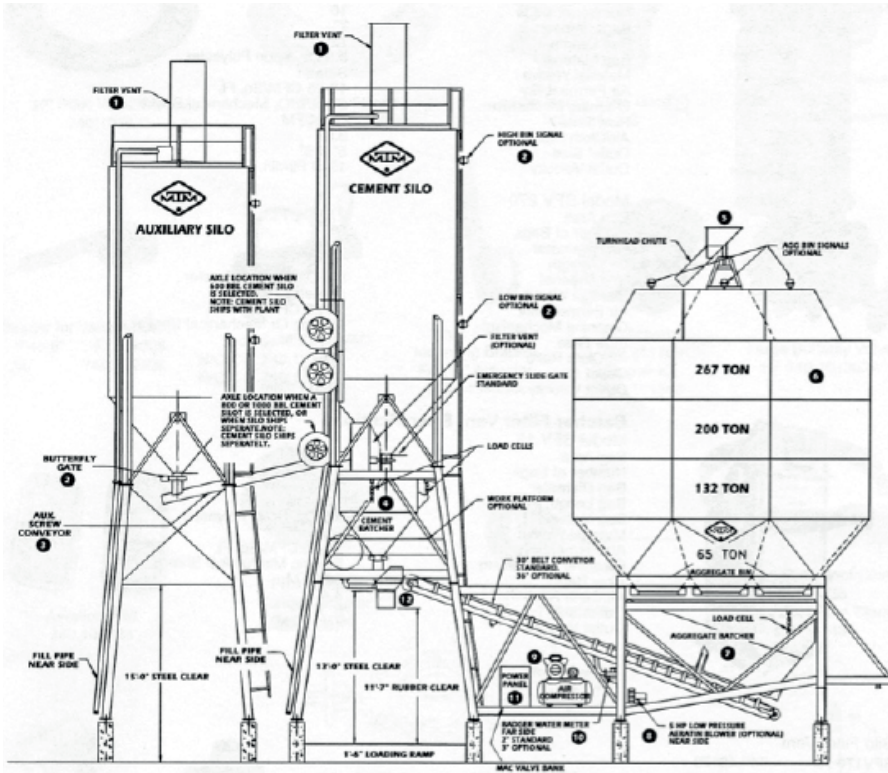


Figura 42. Vista de planta Hormigonera dosificadora, según catálogo de partes
Tomado de [23]



Item	Description	Page #	Item	Description	Page #
1	Filter Vents	4	8	Low Pressure Aeration	14
2	Cement Silo	5	9	Air Compressor	14
3	Screw Conveyor	6	10	Water System	15-16
4	Cement Batcher	7-8	11	Mac Manifold	17-18
5	Turnhead	9	12	Conveyor	19
6	Aggregate Bin	10-11		Air System	20
7	Aggregate Batcher	12-13		Misc. Parts	21-22
				Central Dust Collector	23

Ahora bien, existen muchas microempresas (talleres pequeños, montallantas, fábricas de alimentos “artesanales”, etc.) que no tienen un Plan de mantenimiento formal, peso eso no quiere decir que no puedan idear y aplicar unas RBM diarias y semanales, con las cuales tener un control básico y mínimo sobre la empresa, lo cual les rendiría beneficios en el corto., mediano y largo plazo.

3.2.9 Formatos y documentación básica para la administración del mantenimiento

Este numeral pretende responder las preguntas: ¿Qué formatos van a apoyar la recolección y el procesamiento de información relativa a Mantenimiento? y ¿Cómo se va a medir la efectividad de resultados? La primera pregunta será respondida en su totalidad en este numeral, mientras que la segunda pregunta será resultada parcialmente aquí y complementada posteriormente en el Capítulo 12.

Los formatos básicos que requiere un plan de mantenimiento son:

- Maestro de máquinas, con su respectiva codificación (*numerales 3.2.1 y 3.2.2*)
- Tarjeta maestra de datos TMD y su correspondiente archivo (*numeral 3.2.3*)
- Formatos de Hojas de vida de equipos (*numeral 3.2.4*)
- Listado de requerimientos o tareas LEMI (*numeral 3.2.5*)
- Listado de Instructivos o Estándares de mantenimiento (*numeral 3.2.6*)
- Tableros de control o cronogramas de mantenimiento (*numeral 3.2.7*)
- Listado de Rutinas básicas de mantenimiento RBM (*numeral 3.2.8*)
- Listado de tareas de Mantenimiento rutinario ejecutadas
- Listados de partes de recambio y de desgaste
- Formato de orden de trabajo
- Listados de Órdenes de trabajo pendientes de ejecutar, en ejecución, reprogramadas y canceladas
- Indicadores de mantenimiento (*Capítulo 12*)
- Control de costos y gastos (alimentación, consulta, proyección, etc.)

En los **Listados de tareas de mantenimiento rutinario ejecutadas** se almacena la información básica de las tareas de mantenimiento que no ameritan relacionarse en las Hojas de Vida (ver *numeral 3.2.4*). En este momento se hará una distinción entre empresas que no poseen software de mantenimiento CMMS (ver *numeral 3.10* para el concepto CMMS), y las que sí poseen software de Mantenimiento CMMS. En el caso de las primeras, y asumiendo que tienen manejo y control de información (manualmente o con hoja electrónica), dicho control se puede llevar con un sencillo cuadro como el mostrado en la tabla 16. Una ventaja de un cuadro de estos es que permite rastrear y analizar situaciones tales como: consumos repetitivos de algún elemento, reparaciones repetitivas de alguna máquina/equipo, la no ejecución de alguna tarea, consumos rutinarios de componentes, identificación de responsabilidades del ejecutante en una tarea errónea, etc.

Tabla 16. Formato básico para control de Tareas de Mantenimiento rutinario

Ítem	Fecha	Contador u horómetro	N° OT o Descripción de la tarea	Ejecutante	Observaciones

En el caso de las empresas que poseen CMMS y dependiendo del potencial de este, basta con cerrar las Ordenes de trabajo, generar una consulta o *query* y analizar lo que sea de interés. Para el caso de los *Listados de partes de recambio y de desgaste* consultar el *Capítulo 12*.

Formato de Orden de Trabajo (OT). Es el documento con el cual se le indica al ejecutante que debe proceder a ejecutar una labor de mantenimiento. En la modalidad convencional, la OT se le entrega físicamente al ejecutante u operario, o se le hace llegar vía correo electrónico; en la actualidad con el auge de las TIC's, es posible hacerle llegar la OT al smartphone del ejecutante, y que éste confirme desde allí que ha sido ejecutada.

Existen muchos modelos de OT, bien sea manuales o digitales, pero esencialmente deben constar de:

Fecha de elaboración, fecha en que se debe ejecutar la tarea, hora de ejecución (si es preciso), nombre del ejecutante, instructivo asociado (sea genérico o específico), máquina/equipo a intervenir, nombre y cargo de quién la programa, espacio para Observaciones y espacio para la firma del ejecutante. La Figura 43 presenta un pantallazo de una OT, arrojada por el CMMS *MPSSoftware*.

Las OT se subdividen en *Estándar y No Estándar*. Una OT Estándar OTs es aquella que resulta de aplicar un Plan de Mantenimiento Preventivo (tarea contemplada en un listado LEMI), por lo tanto, tienen asociados frecuencia e instructivo. Una OT no Estándar OTnS no obedece al Plan de Mantenimiento Preventivo, y regularmente no tienen asociadas frecuencias e instructivos. Una OTnS surge en una de las siguientes situaciones:

- Correctivo programado resultado de la realimentación de una OTs ejecutada.
- Correctivo programado originado por observaciones de ejecutante, supervisor, jefe, etc.

- Correctivo de emergencia, resultado obvio de una falla funcional.
- Modificación de máquina/equipo.
- Reparación mayor u *overhaul*.

Figura 43. Orden de Trabajo emitida por un CMMS
Tomado de MP Software [24]

ORDEN DE TRABAJO IMPRESA

Grupo:	Centro de Costo: <i>SERV. GUALES</i>	noviembre 4, 1997
Pendientes al: 411/97	Lección Actual: 24298 Hrs.	1:34PM
Prioridad Actividad:	Especialidad Actividad:	
Asignado a: <i>ROBERTO AYALA</i>		Folio: 28
Realizó: _____	Hora Inicial: _____	
Aprobó: _____	Hora Final: _____	
Vale almacén: _____	Duración: _____	

	Próximo a anterior	Realizado
MANTENIMIENTOS PREVENTIVOS		
- LIMPIAR: Filtros	24120	<input type="checkbox"/>
MANTENIMIENTOS CORRECTIVOS		
- REVISAR PERDIDA DE CAPACIDAD EN EL SISTEMA	24298	<input type="checkbox"/>
1.- Limpiar los tubos del enfriador. 2.- Rectificar el refrigerante eliminando el exceso de aceite. 3.- Regular la velocidad según la carga. 4.- Revisar las placas divisorias. 5.- Revisar y reemplazar juntas rotas en la caja de agua del enfriador.		

Comentarios Generales:
Favor de avisar al Ing. Ramón Cardenas cuando los trabajos hayan terminado.

pag. 4 de 4

← → MENU

La emisión de una OTs obedece a la aplicación de las fórmulas 10, 11 y 12, dependiendo de la frecuencia que haya sido tomada como referencia para elaborar los Tableros de control (recordar *numeral 3.2.7*).

$$F_{ne} = F_{ue} + F \tag{10}$$

Donde

F_{ne} es la fecha de la nueva ejecución;

F_{ue} es la fecha de la última ejecución;

F es la frecuencia en días calendario.

$$H_{ne} = H_{ue} + F_h \quad (11)$$

Donde

H_{ne} es el horómetro de la nueva ejecución;

H_{ue} es el horómetro de la última ejecución;

F_h es la frecuencia en horas de operación.

$$S_{ne} = S_{ue} + F_s \quad (12)$$

Donde

S_{ne} es el recorrido para la nueva ejecución;

S_{ue} es el recorrido de la última ejecución;

F_s es la frecuencia en espacio recorrido.

Con un Plan de mantenimiento debidamente administrado es vital que un funcionario regularmente llamado *Programador de Mantenimiento*, esté al tanto de alimentar los contadores (horómetros, odómetros, fechas, contadores de producción, etc.), y con base a las fórmulas 10, 11 y 12, determine en qué momento surgen nuevas OTs. A las OTs y OTnS se les asignan diferentes estatus: emitida, en espera de autorización, autorizada, en espera de materiales, en ejecución, cerrada, reprogramada, cancelada. Una OT cerrada es aquella que ya se ejecutó, mientras que una OT cancelada es aquella que temporal o definitivamente no se puede ejecutar. Cuando el ejecutante ha concluido una OT debe diligenciar el formato de la misma, anotando la fecha y contador en que efectivamente se realizó, colocando las observaciones pertinentes (si hay lugar), y firmando (física o digitalmente) en constancia de que la labor se cumplió y devolverla al *Programador de Mantenimiento*.

Otras funciones adicionales del *Programador de Mantenimiento* son: gestionar los recursos requeridos por las OT, verificar cuáles Órdenes de Trabajo se emitieron y allegarlas a los ejecutantes, recibir las realimentaciones de las OT ejecutadas, cerrar las OT y reprogramar o cancelar OT si la situación lo amerita.

Para apoyar la labor de control de ejecución de las OT se puede utilizar un cuadro (manual o sistematizado en un CMMS) como el mostrado en la Tabla 17.

Tabla 17. Formato básico para control ejecución de OT

Ítem	Fecha	Contador	N° OT	Ejecutante	Observaciones

En el caso de las OTnS, su emisión, control, supervisión, cierre, reprogramación y cancelación se maneja de manera homóloga al procedimiento descrito líneas arriba para las OTs.

Por último, las OT son instrumentos de realimentación que bien aprovechados sirven para evaluar posteriormente costos representados en insumos, repuestos, mano de obra y tiempos de parada de planta.

3.2.10 Software de mantenimiento CMMS

Hasta hace unos años era común que los departamentos de Mantenimiento fuesen administrados de manera manual y en copia dura (papel y carpetas físicas), es decir, sin la asistencia de los computadores. En el caso colombiano, desde comienzos de la década de 1990 se inició la ola de sistematización de procesos, entre ellos el de la administración del mantenimiento y sus diferentes tareas.

Muchas micros y pequeñas empresas colombianas, a pesar que usan computadores, tienen todos o algunos de los siguientes problemas: no tienen encargados de mantenimiento o su nivel de escolaridad y capacitación es muy bajo, no tienen con qué adquirir un software de mantenimiento económico, solo aplican mantenimiento correctivo; en la mayoría de situaciones relacionadas lo poco que administran lo hacen manualmente, es decir papelería física, en el cuaderno de un mecánico polivalente, o en una carpeta del administrador de la empresa. En el otro extremo se encuentran muchas pequeñas, medianas y grandes empresas que llevan dos y hasta tres décadas de venir sistematizando sus procesos, entre ellos la función Mantenimiento.

Un *software* de mantenimiento o CMMS (*Computerized Maintenance Management System*, por sus siglas en inglés) constituye la solución genérica para gestionar la información concerniente a Mantenimiento. Los CMMS pueden tomar configuraciones tan sencillas como una hoja electrónica *Excel* diseñada para tal fin, pasando por aplicaciones de *Visual Basic* soportadas por bases de datos *Access*, llegando a aplicaciones complejas embebidas en software corporativos.

Una forma de clasificar los CMMS es basándose en su capacidad, pensando en qué tamaño de empresa pueden atender; en ese orden de ideas existen CMMS para microempresas, para pequeñas y medianas empresas (*MPSoftware*, *GIMAO*) y CMMS para grandes empresas (por ejemplo, el SAP y el JDE).

Los CMMS para microempresas, generalmente, son hojas electrónicas sencillas (en *Excel* regularmente) diseñadas por el encargado del Mantenimiento, cumplen un cometido básico, y como reza el adagio popular “son mejores a no tener nada”. Los CMMS para pequeñas y medianas empresas son mucho más completos y complejos que los de las microempresas, y regularmente se caracterizan por que no tienen conectividad con otras dependencias de la compañía (por ejemplo, con Recursos Humanos, Nómina, Contabilidad, Almacén general, etc.). Por último, Los CMMS para grandes empresas constituyen un módulo de un gran paquete computacional que gestiona la información de toda la compañía (nómina, compras, contabilidad, almacén, despachos, Mantenimiento, etc.), tanto en el caso de que haya o no sucursales (nacionales o internacionales); un CMMS para gran empresa requiere una infraestructura de *hardware* y *software* compleja y costosa (servidor, redes, PC, licencias, personal de soporte, desarrolladores de aplicaciones, etc.).

En lo normal, un CMMS debe ser capaz de procesar información concerniente a:

- Creación de un plan de Mantenimiento (*numerales 3.2.1 a 3.2.8*)
- Gestión de las OT (*numeral 3.2.9*).
- Planeación y programación de recursos (físicos, humanos, información, etc.).
- Elaboración de indicadores de gestión
- Gestión de costos (*Capítulo 18*)
- Elaboración de informes gerenciales.

El proceso de elegir entre un CMMS propio (desarrollado en la empresa) o uno comercial, y en el caso del comercial elegir entre diferentes posibilidades disponibles, debe basarse en el análisis y validación los criterios generales mencionados a continuación [2]:

- | | |
|---|---|
| - Funcionalidad | - Compatibilidad de <i>hardware</i> |
| - Calidad de las bases de datos | - Flexibilidad |
| - Facilidad de modificación | - Facilidad de elaboración de consultas |
| - Facilidad operativa (Amigable con el usuario) | - Asistencia técnica |
| | - Documentación de respaldo |

- Facilidad de actualización
- Historial previo del *software*
- Costo de instalación
- Costo adquisición *hardware* y *software*
- Portabilidad y conectividad
- Seguridad

A nivel académico, en la Universidad Tecnológica de Pereira se han diseñado y sistematizado planes de mantenimiento, para diversas empresas (micros, pequeñas y medianas), haciendo uso de herramientas computacionales regularmente disponibles en el sistema operativo Microsoft (*Excel, Access, Visual Basic*); ejemplos de estos trabajos y aplicativos de *software* se pueden consultar en las referencias [25, 26, 27, 28, 29].

3.2.11 Dinámica de operación del Mantenimiento Preventivo

Con el propósito de complementar lo concerniente a la gestión de las órdenes de trabajo se ha elaborado el diagrama de flujo presentado en la Figura 44. Se sugiere al lector relacionar el análisis de este diagrama de flujo, comparándolo con el esquema de la Figura 2 (*numeral 1.2.3 Dinámica de un Sistema de Mantenimiento*, en el entendido que el diagrama de flujo se corresponde con los cuadros *Programar* y *Ejecutar*).

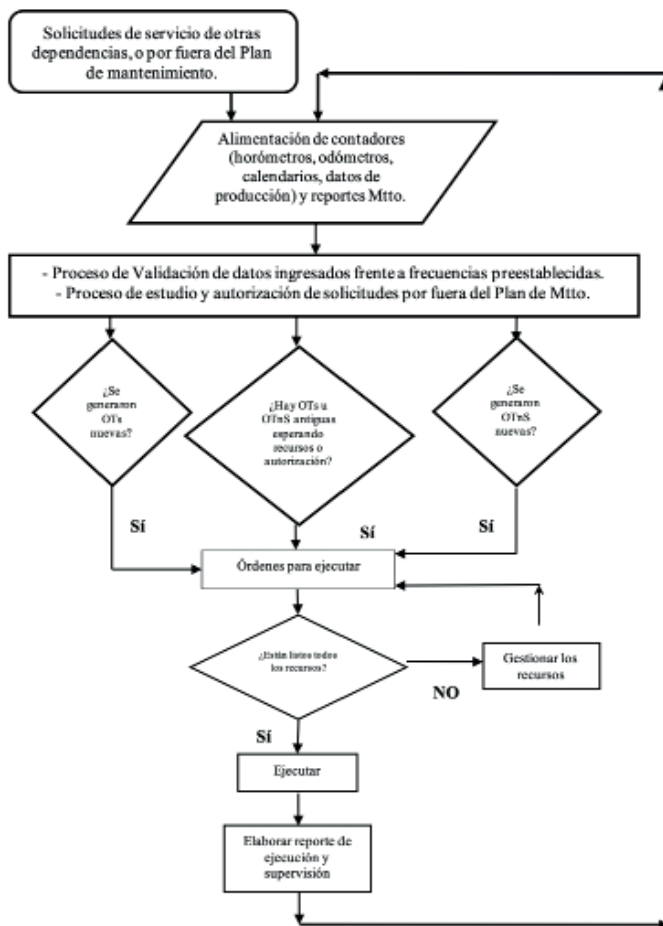
3.3 Preguntas de consulta o análisis

- Ubique el esquema (real o ficticio) de una planta de producción. Defina el tipo de *layout* de planta de dicha empresa. Establezca un sistema de codificación hasta llegar al nivel de componente. Del *layout* elija una máquina/equipo y un componente suyo, y explique el sistema de codificación creado.
- Explique con base a las curvas pertinentes (vistas en el presente capítulo) por qué no es recomendable realizar Mantenimiento Preventivo en exceso.
- ¿Las frecuencias de ejecución del Mantenimiento Preventivo son fijas o variables? Justifique la respuesta. En el evento de ser variables ¿Con base en qué varían?
- Genéricamente ¿De cuánto orden es la efectividad de resultados que se obtiene al aplicar Mantenimiento Correctivo?
- Suponiendo que uno de los funcionarios del Taller de máquinas-herramienta de la UTP diseñara una RBM *diaria* para las máquinas que operan bajo el principio de arranque de viruta, ¿Qué actividades probablemente

propondría y cuál sería el orden de ejecución? Tenga en cuenta cuáles máquinas trabajan a diario en el taller, consulte los cursos de los diferentes programas que hacen uso del taller.

- Consulte y elabore las rutinas básicas de mantenimiento (diaria, semanal y mensual) para un camión doble-troque, con carrocería de furgón y refrigerada, para transporte intermunicipal.
- Consulte y elabore las rutinas básicas de mantenimiento (diaria, semanal y mensual) para un carro recolector de basura, es decir camión doble-troque y la caja compactadora.

Figura 44. Diagrama de flujo de administración de las Órdenes de trabajo

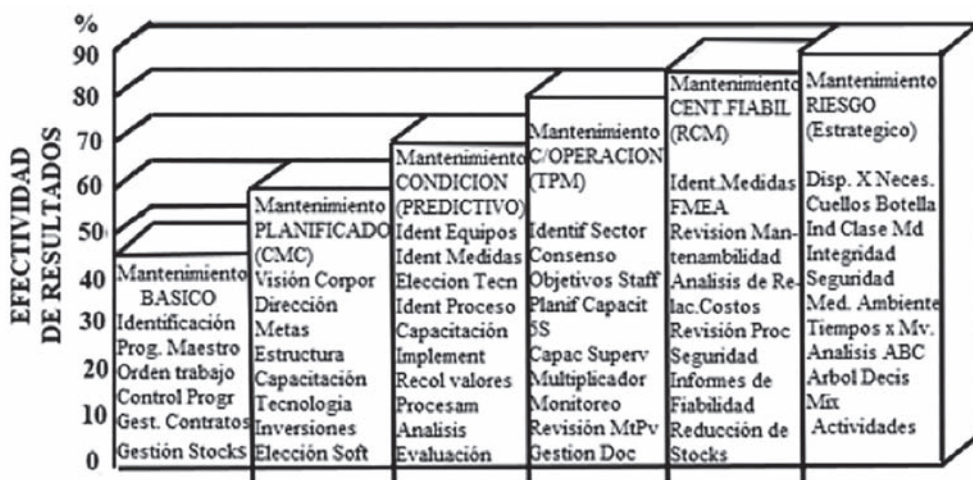


3.4 Para reflexionar: el mantenimiento en Risaralda y la competitividad

La Figura 45 recuerda la efectividad de resultados del Mantenimiento en función de la tecnología o sistema de mantenimiento aplicado. Obsérvese que con Mantenimiento Productivo Total TPM se alcanzan órdenes de efectividad del 80%, mientras que con Mantenimiento Preventivo la efectividad ronda solo el 46%.

El tema de reflexión del “Capítulo 1. Mantenimiento ¿una vía de escape al subdesarrollo?” mostró como países, tercermundistas, que han aplicado sistemáticamente Mantenimiento Productivo Total TPM, aunado a políticas de estado dirigidas al desarrollo (aumento del IDH, apropiación del *Know-How*, producción de bienes de elevado valor agregado, inversión en infraestructura, etc.) se proyectan ahora como potencias económicas mundiales, caso más digno de mostrar, el de la India, que en unas cuantas decenas pasó de ser un país sumamente atrasado a formar parte de las 10 economías más grandes del mundo, con crecimientos y desarrollos sostenidos. Asimismo, se ilustró cómo el semillero de empresas indias que viene aplicando TPM es sumamente alto, y adicionalmente, como se ahondará en el *Capítulo 5*, la aplicación de TPM implica un cambio de mentalidad de todos los miembros de la compañía, lo cual es vital para el desarrollo sostenible.

Figura 45. Efectividad de los resultados en función del sistema o Tecnología de Mantenimiento empleada. Tomado de [9]



Ahora bien, entre aplicar Correctivo o Preventivo (como estrategia principal de mantenimiento), obviamente presenta mejores bondades el segundo sistema; téngase en cuenta que en la Figura 45 ni siquiera se presenta el Correctivo en su

escala; sin embargo, el Preventivo también presenta desventajas (Tabla 5, numeral 1.5.3), siendo la principal a juicio del autor, que no propende al **mejoramiento continuo**, decir, la visión sistémica del Preventivo es trabajar más sobre instalaciones y máquinas/equipos que sobre las personas, y finalmente el desarrollo sostenible depende más de las personas que de los equipos e instalaciones, lo cual conlleva a la efectividad mencionada del 46%.

En el año 2007, desde la Universidad Tecnológica de Pereira, se condujo un estudio tendiente a determinar los sistemas de mantenimiento empleados por las grandes, medianas y pequeñas empresas del área metropolitana Pereira-Dosquebradas [10]. La estructura de la encuesta utilizada es la mostrada a continuación:

ENCUESTA SOBRE LAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO USADAS POR LA INDUSTRIA DEL ÁREA METROPOLITANA PEREIRA-DOSQUEBRADAS



La encuesta que se presenta a continuación tiene por objetivo diagnosticar y precisar el estado de la función Mantenimiento en las grandes y medianas industrias del área metropolitana Pereira – Dosquebradas. De la veracidad de sus respuestas depende la obtención de resultados confiables.

I. DATOS GENERALES:

Fecha: _____ Encuesta N°: _____

Nombre de la empresa: _____

NIT: _____

Actividad económica: _____

Nombre del encuestado _____

Cargo que ocupa (Director o Jefe de Mantenimiento) _____

II. DATOS DE MANTENIMIENTO:

1. ¿Qué tipos de Mantenimiento practica su Empresa y en cuánto porcentaje aproximado?

Correctivo % _____

Preventivo % _____

Predictivo % _____

TPM % _____

RCM % _____

Otro ¿Cuál? _____ % _____

2. ¿Qué clase de mantenimiento correctivo realiza?

Emergente (es una actividad imprevista)

Programado

3. ¿Qué personal está formalmente involucrado en el Mantenimiento?

Directo ¿Cuántos? _____

Temporal ¿Cuántos? _____

Subcontratado ¿Cuántos? _____

Operativos ¿Cuántos? _____

Administrativos ¿Cuántos? _____

Ninguno

4. Si tiene mantenimiento subcontratado, ¿Quiénes prestan el servicio?

Técnicos particulares

Proveedores locales

Proveedores extranjeros

5. ¿Cuál es el nivel de escolaridad de las personas involucradas en el Mantenimiento?

	Primaria	Secundaria	Técnico	Pregrado	Postgrado
Administrativo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Supervisión	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Operativo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Subcontratista	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6. Frecuencia o periodicidad con que efectúa el Mantenimiento.

Diario Semanal Mensual Anual
Otra ¿Cuál? _____

7. ¿Cuáles de las siguientes tareas principales de Mantenimiento realiza?

Lubricación Electricidad Mecánica Instrumentación
Todas las anteriores Otra ¿Cuál? _____

8. ¿Qué herramientas y equipos de apoyo utiliza para realizar el Mantenimiento?

Mecánicas
Eléctricas
Electrónicas
Hidráulicas
Neumáticas
Otras

¿Cuáles? _____

9. ¿Qué inconvenientes (y en qué porcentaje) tiene con el tipo de Mantenimiento que regularmente aplica? Deben sumar 100%.

Falta de disponibilidad de los equipos % _____
Falta de planeación de las tareas % _____
Inconvenientes al momento de ejecutar la tarea
(insumos, repuestos, personal) % _____
Cooperación con Producción u otros departamentos % _____
Presupuesto limitado % _____
Falta de capacitación % _____
Falta de información sobre los equipos % _____

Otros ¿Cuál? _____ % _____

10. ¿Han pensado cambiar de sistema de Mantenimiento?

Sí No

¿Por qué? _____

11. ¿Usan software de Mantenimiento?

Sí No ¿Cuál? _____

12. Si usan software para Mantenimiento, ¿Qué porcentaje del potencial del software considera que utilizan?

Entre 0 y 20%

Entre 20 y 40%

Entre 40 y 60%

Entre 60 y 80%

Entre 80 y 100%

13. ¿Están satisfechos con las prestaciones del software que actualmente poseen?

Sí No

¿Por qué no? _____

14. ¿Poseen almacén de repuestos para Mantenimiento?

Sí No

15. ¿El almacén es administrado con la ayuda de algún software?

Sí No

¿Cuál? _____

16. ¿Qué elementos de Seguridad Industrial utilizan?

Monogafas Caretas Guantes Fajas

Cinturón de seguridad Traje para soldar

Calzado de seguridad Arnés de seguridad

Otros ¿Cuáles? _____

17. ¿Tienen en cuenta los cuidados al Medio Ambiente en el momento de realizar el Mantenimiento?

Sí No Parcialmente

¿Con qué tipo de medidas (Recolección de polvos y humos, recolección de aceites usados, tratamiento de aguas, entre otros)?

18. ¿En la gestión de mantenimiento, que es lo que más valora la empresa?

Calidad de los trabajos
Costos de Mantenimiento
Disponibilidad de las instalaciones
Seguridad de las instalaciones
Todas las anteriores

19. ¿Cuánto porcentaje aproximado del presupuesto anual de gastos de la empresa corresponde a Mantenimiento?

% _____ No sabe

20. ¿Manejan indicadores de mantenimiento?

Sí No

¿Cuáles? _____

21. ¿Usan los indicadores como referente para implementar mejoras?

Sí No

¿Cómo? _____

Responda a las preguntas 22 a 25 sólo si señaló la casilla “Preventivo” de la pregunta N° 1.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO

22. ¿Al operario se le entrega Orden de Trabajo al momento de ejecutar la tarea de mantenimiento?

Sí No

23. ¿Realimentan y cierran las Órdenes de Trabajo?

Sí No

24. ¿Tienen documentados los procedimientos de ejecución del mantenimiento (Instructivos)?

Sí No

25. Al momento de realizar el mantenimiento preventivo, ¿cuál periodicidad recomendada utiliza?

- Del fabricante
- De los resultados estadísticos
- De los indicadores de producción
- De la experiencia
- Del conocimiento de los operarios a cargo
- Todas las anteriores

Responda a las preguntas 26 a 28, sólo si señaló la casilla “Predictivo” de la pregunta N°1.

MANTENIMIENTO PREDICTIVO

26. ¿Cuál de las siguientes técnicas utilizan para realizar el Mantenimiento Predictivo?

- Análisis de vibraciones
- Análisis de lubricantes
- Análisis por ultrasonido
- Termografía
- Otra ¿Cuál? _____

27. Para el Mantenimiento Predictivo, ¿usan equipo propio o alquilado?

- Propio ¿Cuál? _____
- Alquilado ¿Cuál? _____

28. ¿Con el Mantenimiento Predictivo ha sido posible detectar fallas en gestación, con antelación, para aplicar correctivos y evitar paros no programados?

Sí No

Responda a las preguntas 29 a 34 sólo si señaló la casilla “TPM” de la pregunta N° 1.

MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL TPM

29. ¿Realizan Mantenimiento Autónomo?, es decir, capacita y entrena a sus operarios de tal manera que mantengan sus equipos en un buen estado, realizando tareas básicas.

Sí No

30. ¿Qué tareas de Mantenimiento Autónomo realizan?

Limpieza Lubricación Ajustes menores

Otro ¿Cuál? _____

31. ¿Conoce el sistema de las 5s'?

Sí No

¿Lo tienen implementado?

Sí No

32. ¿Manejan estadísticas de mejora antes y después de la aplicación del mantenimiento Productivo Total?

Si No

33. Implementan mejoras focalizadas para eliminar cuales de las siguientes grandes pérdidas:

- Pérdidas en las Máquinas
- Pérdidas en Mano de Obra
- Pérdidas en Métodos
- Pérdidas en Materia Prima
- Pérdidas de Energía
- Pérdidas en Medio Ambiente

34. ¿Qué personal de la Empresa ha sido sensibilizado y muestra compromiso frente a la función del departamento de Mantenimiento?

Alta Gerencia Sí No

Directivos Sí No

Supervisores Sí No

Operarios Producción Sí No

Otros departamentos Sí No

¿Cuáles? _____

Responda a las preguntas 35 a 39 sólo si señaló la casilla "RCM" de la pregunta N°1.

MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD RCM

35. ¿Han cuantificado las criticidades de los equipos?

Sí No

36. ¿Han hecho estudios para identificar las principales fallas funcionales de los equipos y la estrategia a seguir (FMECA)?

Sí No

37. ¿Implementan cadenas de razonamiento de RCM para determinar la estrategia de solución más pertinente a las fallas funcionales de equipos identificados como de alta criticidad?

Sí No

38. ¿Documentan las labores realizadas con el RCM, de manera que se validen los ahorros y mejoras obtenidas con este mantenimiento, con respecto al preventivo?

Sí No

39. ¿En cuánto porcentaje se ha reducido la carga de preventivo luego de la implementación del RCM?

% _____

SISTEMA DE CALIDAD ISO

40. ¿Su empresa cuenta con certificación de calidad ISO?

Sí No

¿Cuáles? _____

41. ¿Involucraron la función mantenimiento como un Sistema de Gestión dentro del Programa de Calidad ISO?

Sí No

42. ¿La empresa ha alcanzado la certificación ISO 14000 (Normas para cuidado y preservación del medio ambiente)?

Sí No

43. ¿La empresa ha alcanzado la certificación ISO 18000 (Normas para cuidado de la Salud

Ocupacional y Seguridad Industrial en la Empresa OSHAS)?

Sí No

En caso de haber respondido NO a alguna de las anteriores cuatro 4 preguntas, responda las siguientes:

44. ¿Está interesada la empresa en optar a alguna de las certificaciones anteriores?

Sí No ¿Cuál(es)? _____

45. ¿Están trabajando actualmente en la implementación de alguna de ellas?

Sí No ¿De cuáles? _____

De acuerdo con los resultados del estudio [10], el Preventivo es el sistema de Mantenimiento más ampliamente aplicado entre las grandes empresas de las ciudades de Pereira y Dosquebradas (Risaralda), mientras que en las medianas impera el Correctivo, tal como lo determinó un estudio realizado en el año 2007; las Figuras 46 y 47 corroboran lo enunciado.

De la Figura 46 se observa que el 51,5% de las grandes empresas aplican Preventivo como sistema de Mantenimiento principal, mientras que el 36,0% aplican Correctivo y el 10,0% está representado por los sistemas de más alta efectividad (TPM y RCM), panorama que no es nada halagador en un mundo tan altamente competitivo.

Figura 46. Sistema de Mantenimiento aplicados por las grandes empresas del área metropolitana Pereira – Dosquebradas. Tomado de [10]

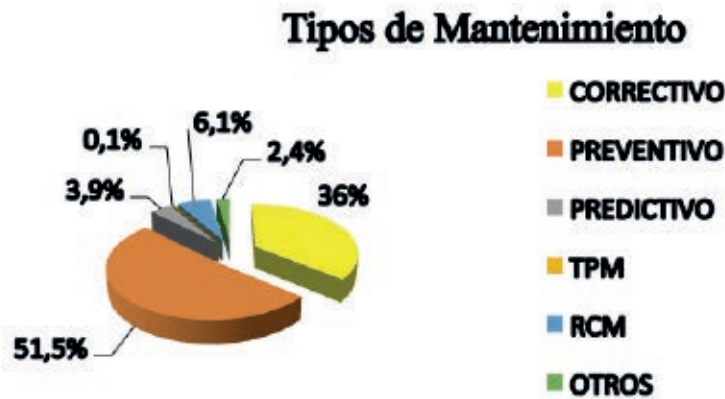
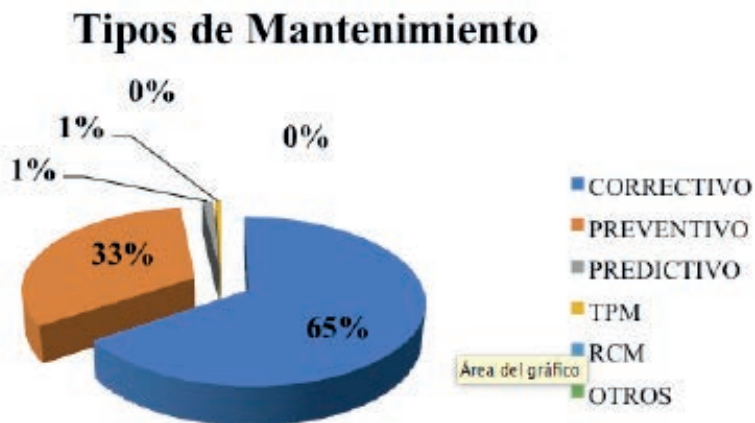
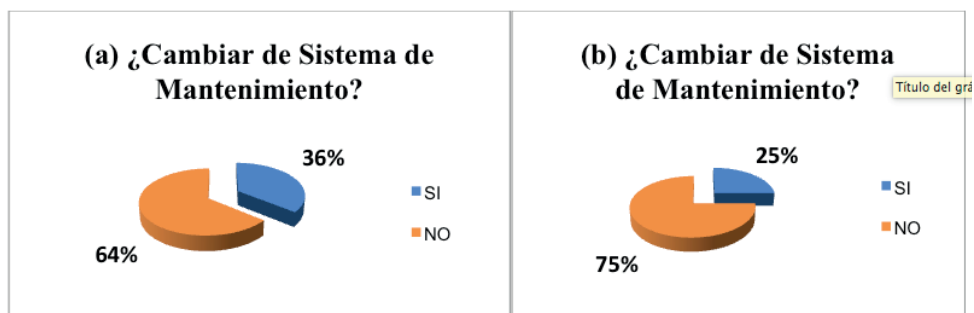


Figura 47. Sistema de Mantenimiento aplicados por las medianas empresas del área metropolitana Pereira – Dosquebradas. Tomado de [10]



De la Figura 47 se observa que el 65% de las medianas empresas aplican el Correctivo como sistema de Mantenimiento principal, mientras que solo el 33% aplican el Preventivo y el aporte de los sistemas más avanzados es apenas residual. Este es un panorama muy preocupante en comparación con las grandes empresas. La Figura 48 ilustra que el 36% de las grandes empresas *No piensan cambiar de sistema de Mantenimiento*, mientras que en el caso de las medianas empresas el porcentaje pasa al 75%, es decir, aparentemente, se encuentran en una *zona de confort*.

Figura 48. Respuesta a pregunta ¿Piensan cambiar de sistema de Mantenimiento? (a) Grandes empresas. (b) Medianas empresas. Tomado de [10]



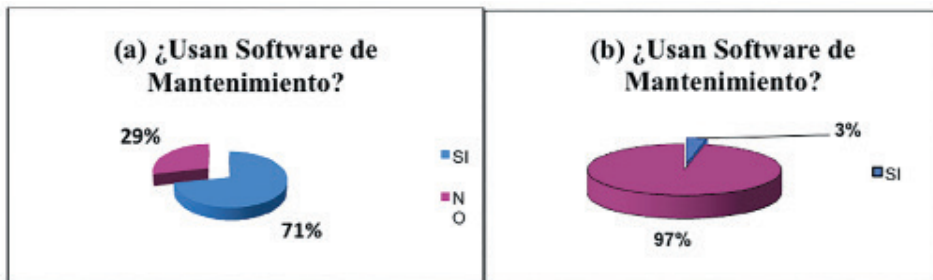
La Figura 49 muestra que el 71% de las grandes empresas *Sí usan software de Mantenimiento*, mientras que en las medianas empresas solo el 3% lo hacen. Sin que

la estadística de las grandes empresas sea el *caso soñado*, el panorama de las medianas empresas es preocupante, dada la tendencia mundial a invertir en sistematización de procesos, en sus diversos aspectos, con las ventajas que ello acarrea. Otro aspecto preocupante es el de la baja escolaridad de los supervisores y ejecutantes de mantenimiento, que en gran medida es básica primaria [9].

De acuerdo con la Dirección Nacional de Planeación DNP de Colombia, y en línea con lo prescrito por el Foro económico mundial FEM, los factores que rigen la competitividad son:

- Seguridad y confianza
- Educación y tecnología
- Condiciones macroeconómicas
- Instituciones favorables (sólidas y confiables)
- Infraestructura

Figura 49. Respuesta a pregunta ¿Usan Software de Mantenimiento? (a) Grandes empresas. (b) Medianas empresas. Tomado de [10]



Al margen de los otros factores descritos (que son igualmente importantes), el de *infraestructura* (puertos, aeropuertos y vías de todo tipo), es crucial para la productividad y la competitividad, y lastimosamente nuestro país hasta ahora está licitando las primeras vías 4G y la estructura ferroviaria es prácticamente inexistente. Muchas de las materias primas y piezas verdes para la industria colombiana son importadas, llegan por los puertos y se transportan con grandes sobrecostos a los centros fabriles, para finalmente distribuir en el país o exportar el producto terminado. La mayoría de las grandes empresas del área metropolitana Pereira – Dosquebradas pertenecen a transnacionales (Suzuki, Kimberly Clark, Asea Brown Boveri, Nestlé, etc.), mientras que la mayoría de medianas empresas pertenecen a empresarios locales, generalmente negocios familiares creados, expandidos y mantenidos con mucho tesón.

En medio de este breve panorama presentado, debería ser motivo de reflexión, el hecho de que al aplicar Mantenimiento Preventivo no se obtienen efectividades elevadas, y si adicionalmente una porción importante de la industria del área metropolitana aplica Mantenimiento Correctivo, con casi nula sistematización, ejecutantes de bajo nivel de escolaridad entonces tienen cabida las siguientes preguntas

- ¿Por qué las empresas locales no se han percatado de esa área de oportunidad y han migrado a sistemas de mantenimiento de más elevada efectividad y con miradas más holísticas y sinérgicas?
- ¿Cuál es la prospectiva en el mediano y largo plazo de las medianas empresas locales frente a los actuales Tratados de Libre Comercio? ¿Sobrevivirán?
- En el peor escenario que no sobrevivan ¿Qué pasará con los empleos directos e indirectos que dependen de dichas empresas? ¿Cuál será el impacto en las economías locales?

CAPÍTULO CUATRO

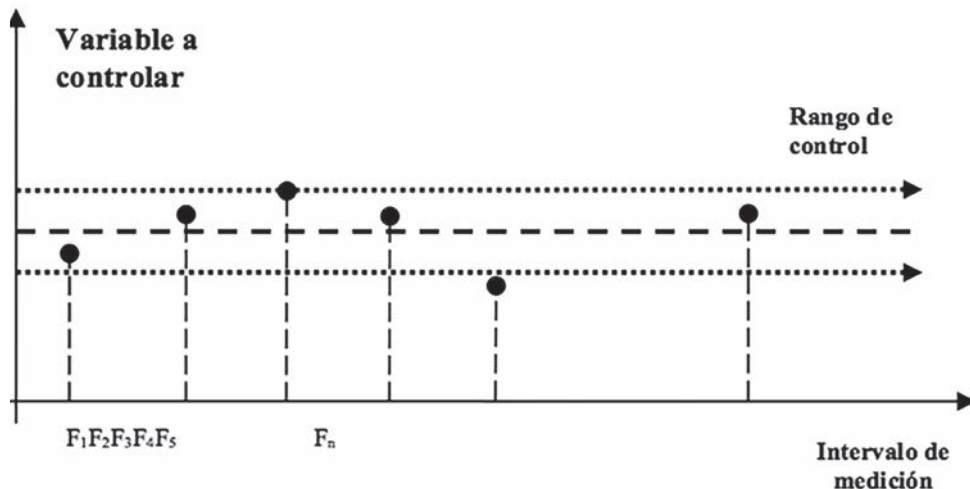
Mantenimiento predictivo PdM

4.1. Introducción

El Mantenimiento Predictivo PdM (*Predictive Maintenance*) es una estrategia de Mantenimiento orientada a *predecir* la ocurrencia de fallas, con base en evidenciar los síntomas de falla que presenta una máquina, midiendo y analizando los *cambios* en variables de operación de esta. El PdM corresponde a una evolución del Mantenimiento Preventivo.

La Figura 50 ilustra una representación del comportamiento general del mantenimiento predictivo aplicado a una variable cualquiera. Se observa que se han definido los intervalos de medición y el rango de control. Los primeros resultados están dentro del rango de control, a pesar de que F_3 esté justo en el límite superior (¡una alarma!). Posteriormente, en F_5 la variable se sale del rango de control y será necesario que se programe una parada para una inspección más rigurosa, y se efectúen ajustes o reparaciones en caso de ser necesario. Una vez hecha la intervención se mide de nuevo, y se observa que en F_n , la variable ha retornado al rango de control y en lo sucesivo, el procedimiento debe continuar.

Figura 50. Comportamiento esperado de una variable controlada en Mantenimiento Predictivo



En el PdM se utilizan pruebas y ensayos (técnicas) específicos tales como:

- Termografías PI - *IT*
- Tintas penetrantes LP - *PT*
- Análisis de vibraciones
- Análisis de aceites en uso
- Ensayos no destructivos clásicos: pruebas radiográficas RX - *RT*, ultrasonido UT activo, partículas magnéticas PM- *MT*

De manera general, y partiendo de una línea base de *Cero Predictivo*, se puede llegar a su ejecución sistemática, aplicando el siguiente procedimiento general:

- Definir variables a seguir (deben ser importantes o sensibles para el proceso productivo)
- Definir pruebas y ensayos (técnicas) a aplicar.
- Fijar los rangos de operación o de control de la variable a estudiar y los intervalos a los cuales se realizarán las mediciones.
- Definir si las mediciones se harán con personal y equipos propios, o vía subcontrataciones [30].
- Realizar periódicamente las mediciones, verificando que la variable a controlar esté dentro del rango predefinido.
- Cualquier desviación por fuera del rango de control es indicativa de fallas en gestación (fallas potenciales), por lo tanto, es necesario entrar a tomar acciones (revisar, inspeccionar, ajustar, calibrar, programar trabajos de mantenimiento correctivo, etc.), antes que la falla potencial se convierta en falla funcional.

Las mediciones en PdM pueden ser puntuales (acorde a una frecuencia pre-establecida) o mediciones “totales”. En las mediciones totales se utilizan sistemas de adquisición de datos y la medición es *online*, y ya se habla entonces de **Mantenimiento Basado en la Condición** o **CBM**

A continuación, se hará una descripción de algunas de las Pruebas y Ensayos más ampliamente aplicadas en PdM. Es conveniente recordar que en una *prueba* se expone o incentiva un cuerpo o material con algún cuerpo o ambiente externo,

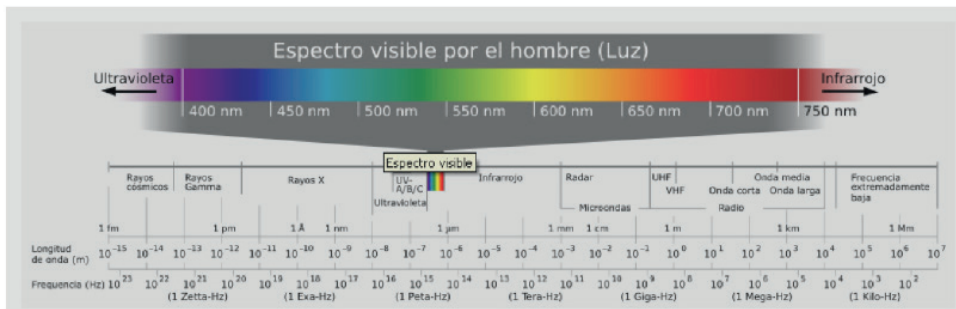
y se espera una repuesta (positiva o negativa) de comportamiento del cuerpo de interés frente a la incentivación. En el caso del *Ensayo* se habla regularmente de un procedimiento más elaborado, probablemente regido por Normas o Estándares, se hacen uso de instrumentos de medición, se obtienen lecturas, las cuales pueden ser interpretadas en sí mismas, o llevadas a un modelo matemático para su posterior análisis.

4.2. Ensayos termográficos

Principio: El espectro electromagnético posee regiones visibles y no visibles para el ojo humano. Sólo parte del rango de longitudes de onda de la luz son visibles para el ojo humano, específicamente el rango comprendido entre los 400 nm y los 750 nm (ver Figura 51); por debajo de los 400 nm se encuentran los rayos ultravioletas, y por encima de los 750 nm se encuentran los rayos infrarrojos, que corresponden a una manifestación de energía infrarroja o térmica o calor; tanto ultravioletas como infrarrojos son invisibles al ojo humano. A diferencia de la luz visible, en el mundo infrarrojo, todo aquello con temperatura por encima del cero absoluto emite calor.

La Termografía es una técnica que, mediante el uso de una cámara sensible a la franja infrarroja, capta y mide la energía térmica emitida por un objeto, de manera que logra la diferenciación y localización de áreas calientes o frías mediante el análisis de la parte infrarroja del espectro electromagnético. Dicho en otras palabras, la termografía es una medición indirecta de temperatura por intermedio de la medición de la emisividad.

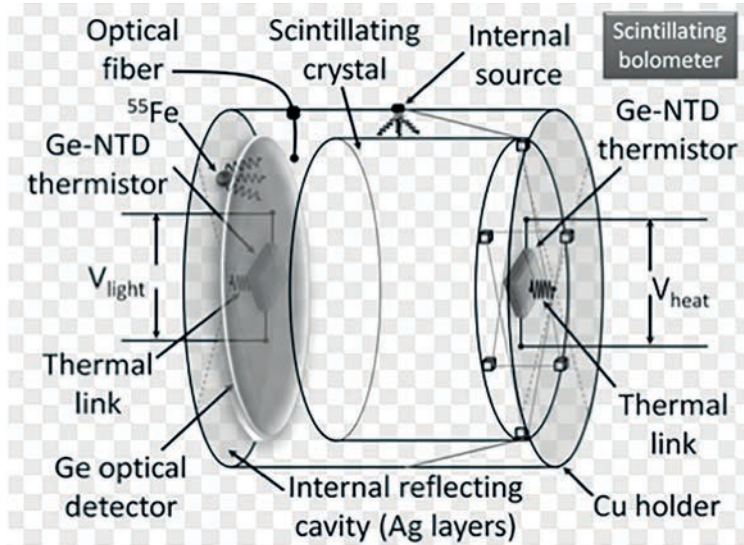
Figura 51. Espectro de longitudes de onda visibles por el ojo humano.
Tomado de [31]



La mayoría de las cámaras termográficas, basan su operación en la utilización de un instrumento llamado *bolómetro* (inventado por *Langley* hacia 1880), el cual mide en todas las longitudes de onda, la cantidad total de radiación electromagnética que viene

de un objeto. Un bolómetro (Figura 52) consiste en un cuerpo absorbente de calor, conectado a un sumidero de calor (un objeto mantenido a temperatura constante) gracias a un material aislante. El resultado es que cualquier radiación absorbida por el detector aumenta su temperatura por encima del sumidero de calor que actúa de referencia. La radiación absorbida se mide por lo tanto a partir del contraste de temperatura entre el detector y la referencia.

Figura 52. Estructura genérica de un bolómetro. Tomado de [32]



Existen dos tipos generales de termografías, la pasiva y la activa. En la *pasiva*, la energía necesaria para incentivar el bolómetro, proviene del objeto en estudio (horno, motor, ser vivo, fruta, etc.); dicho en otras palabras, el elemento a estudiar debe estar en operación. En el caso de la *activa*, el objeto en estudio por sí mismo no irradia calor (en comparación con el ambiente que lo rodea), razón por la cual es necesario incentivarlo con una fuente externa (circuito eléctrico, fuente de calor, etc.), para que irradie y pueda ser medido y analizado. La termografía activa aplica principalmente en el estudio de materiales.

La Termografía *activa* es una técnica bastante utilizada a nivel industrial, porque permite localizar problemas que en circunstancias normales no serían detectados, gracias a la captura y visualización instantánea de imágenes térmicas, y con la medición de temperatura que entrega, localiza fallas en gestación o desarrolladas, sin necesidad de entrar en contacto con el equipo, de desenergizarlo, de detener su operación, de desarmarlo. Las fallas localizadas deberán ser corregidas posteriormente usando las técnicas convencionales (correctivos programados).

Los campos de aplicación de la Termografía son muy amplios. A continuación, se presenta una gama de aplicaciones:

Sistemas eléctricos (Pasiva)

- Instalaciones Eléctricas en general
- Líneas de baja, media y alta tensión
- Contactos en las centrales de control de motores CCM
- Transformadores de potencia y corriente
- Fusibles
- Escobillas

Sistemas mecánicos rotatorios (Pasiva)

- Rodamientos y chumaceras
- Bombas de agua, ventiladores, molinos, etc.
- Motores de combustión interna
- Turbinas

Materiales / Mantenimiento / Análisis estructural (Activa)

- Inspección de fuselajes de avión
- Discontinuidades subsuperficiales y superficiales como la corrosión
- Deficiencias en espesores de recubrimiento.
- Falta de adhesión en materiales compuestos
- Daños por Impacto en materiales compuestos
- Medida del espesor o profundidad en materiales compuestos
- Porosidad en materiales compuestos
- Adherencia de parche en materiales compuestos
- Pérdida de espesor en metales (cañerías, recipientes etc.)
- Evaluación de uniones y empalmes en metales
- Acumulación de sarro en metales
- Adherencia de la pintura

- Corrosión bajo pintura
- Análisis dinámico de fatiga
- Evaluación de la soldadura por puntos
- Vacío, oclusión de aire y deformaciones en material plástico (Polímeros)

Sistemas Térmicos de calentamiento y enfriamiento (Pasiva)

- Hornos y Calderas
- Instalaciones Frigoríficas (Perdidas de frío)
- Reactores
- Intercambiadores de calor
- Torres de enfriamiento
- Perdidas en válvulas y líneas de líquidos/vapor es

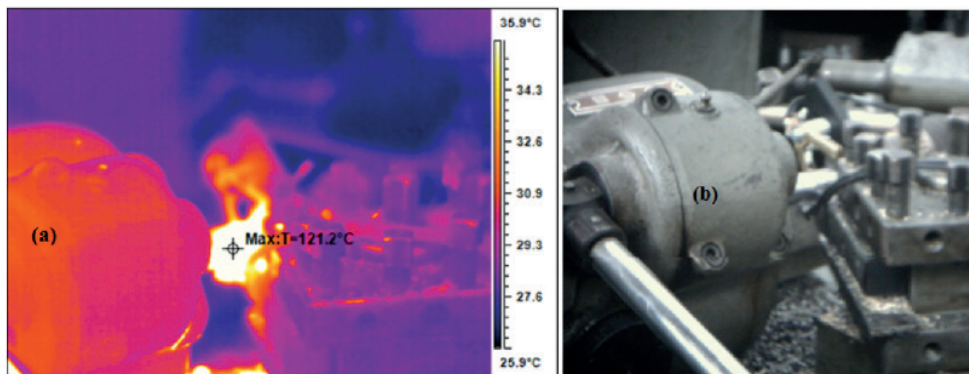
La Figura 53 presenta la vista general de una **cámara termográfica Wuhan Guide TP8S** (como las que posee la Universidad Tecnológica de Pereira). Esta **cámara posee un rango** de medición de -20°C a 600°C , y una resolución de $0,01^{\circ}\text{C}$.

En la Figura 54 se aprecia un ejemplo de los dos tipos de imágenes que entrega una cámara termográfica. En la (a), se aprecia la imagen infrarroja con su respectiva paleta de temperaturas, mientras que en (b) se aprecia la imagen visual respectiva.

Figura 53. Vista general de una cámara termográfica Wuhan Guide TP8S
Tomado de [3]



Figura 54. Ejemplo de una imagen termográfica. (a) Imagen infrarroja. (b) Imagen visual. Tomado de [3]



En la tabla 6 (numeral 1.5.4) se relacionaron las diferentes ventajas y desventajas del mantenimiento Predictivo. Entre las desventajas, y para el caso de los ensayos termográficos, se destacan:

- Alto costo de adquisición del equipo, sin embargo, hay empresas que prestan el servicio, para aplicarlo a equipos y situaciones críticas.
- Una Termografía dice dónde está el problema, pero no necesariamente la causa, es decir, la imagen adquirida debe ser convenientemente interpretada por personal calificado, para determinar tipo y causa del problema, así como la acción a tomar.

4.3. Prueba de líquidos o tintas penetrantes

El método o prueba de líquidos penetrantes LP, se basa en la propiedad física conocida como *Capilaridad*. Recuérdese que la capilaridad es la propiedad de los cuerpos sólidos de atraer y hacer subir por sus paredes hasta cierto límite el líquido que las moja, como el agua, y de repeler y formar a su alrededor un hueco o vacío con el líquido que no las moja, como el mercurio.

Recuérdese, además que cuando interactúan un líquido y un sólido se presentan dos tipos de fuerzas: Las fuerzas de cohesión intermolecular y las fuerzas de adhesión líquido-pared. En el caso que las fuerzas de cohesión molecular sean superiores a las de adhesión líquido-pared, el fluido no ascenderá por la pared, o en otras palabras no habrá capilaridad, o el líquido no moja (caso del mercurio). En el caso que las fuerzas de cohesión molecular sean inferiores a las de adhesión líquido-pared, el fluido ascenderá por la pared, o en otras palabras habrá capilaridad, o el líquido moja la pared (caso del agua).

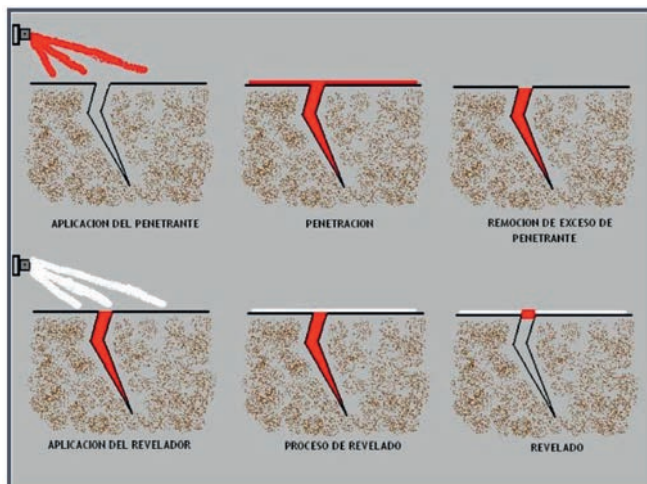
La prueba real con LP, consiste en la aplicación de tres tipos de líquidos o tintas sobre una superficie donde se sospecha hay fisuras (rodamientos, ejes, engranajes, carcasas), dichos líquidos son: Limpiador, Penetrador y Revelador; es obvio que se sospecha de la existencia de la fisura, pero no es visible de lo contrario no tiene sentido la prueba.

En primera instancia (Figura 55) se aplica el líquido Limpiador (regularmente incoloro), para remover grasa, suciedad, óxido, y se limpia la superficie. Seguidamente se aplica el líquido Penetrador (regularmente de color rojo), el cual posee buenas características de penetración. Una vez ha transcurrido un tiempo específico (determinado por el fabricante de los líquidos), para que el líquido penetrador recién aplicado, se aloje considerablemente en cualquier abertura superficial existente, se debe realizar una limpieza del exceso de líquido penetrante depositado en la superficie externa.

A continuación, se aplica un líquido absorbente, comúnmente llamado Revelador (normalmente de color amarillo), el cual absorberá el líquido que haya penetrado en las aberturas superficiales. Si hay fisura, el líquido revelador, se adherirá a las paredes de la fisura puesto que su fuerza de adhesión es superior a la del líquido penetrador, y finalmente, la menor fuerza de adhesión del líquido penetrante propiciará que ascienda por la fisura hasta la superficie.

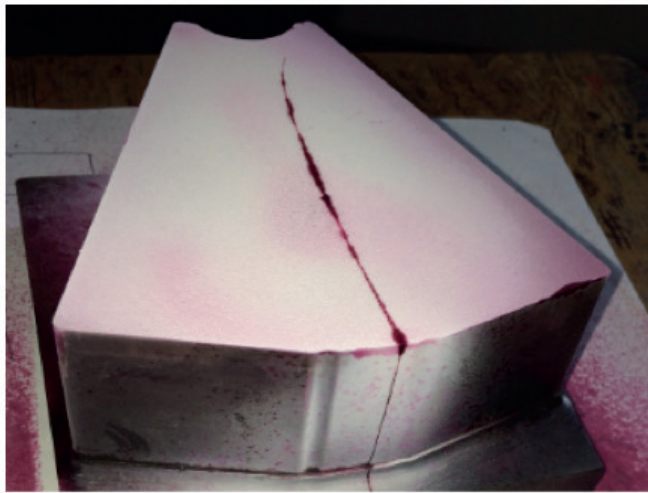
Por último, viene la etapa de observación, las áreas en las que se observe la presencia de líquido penetrante después de la aplicación del líquido absorbente, son áreas que poseen discontinuidades superficiales (grietas, perforaciones, etc.).

Figura 55. Ilustración del ensayo de tintas penetrantes. Tomado de [33]



La prueba de Tintas penetrantes dice si hay o no hay falla estructural (soldaduras, ejes, piñones, etc.), es decir, determina si hay una fractura/fisura que llegue a la superficie, y en dónde está ubicada. Una información más amplia alrededor de las pruebas con tintas penetrantes puede ser consultada en la referencia [34]. En la Figura 56 se presenta el resultado de una aplicación de tintas penetrantes hecha en clase a un troquel. La línea roja indica la existencia de una fisura.

Figura 56. Resultado de prueba de tintas penetrantes a un troquel
Tomado de [3]



4.4. Medición y análisis de vibraciones

Como se mencionó en el *Capítulo 1*, para producir máquinas de mayor velocidad de producción es necesario disminuir masas en movimiento y pesos muertos de estructuras (máquinas menos robustas y más esbeltas), lo que conlleva a que las estructuras sean más sensibles al efecto de las vibraciones generadas por desalineaciones, desbalances, elementos rodantes defectuosos, etc. Lo anterior llevó al desarrollo de técnicas de medición y análisis de vibraciones, para prevenir fallas funcionales y sus consecuencias negativas.

La palabra *vibración* se refiere a los movimientos oscilatorios (hacia delante y hacia atrás) de las estructuras, de los sistemas mecánicos o de sus componentes.

Por lo general, la vibración se caracteriza en términos de amplitud, frecuencia, velocidad y aceleración. La tabla 18 presenta un resumen de las principales fuentes de vibración en los equipos, en función de si la máquina es nueva o ha sido usada durante algún tiempo. Recuérdese que: **“Todo cuerpo que vibra produce ruido”**

Tabla 18. Fuentes de vibración en maquinaria y estructuras

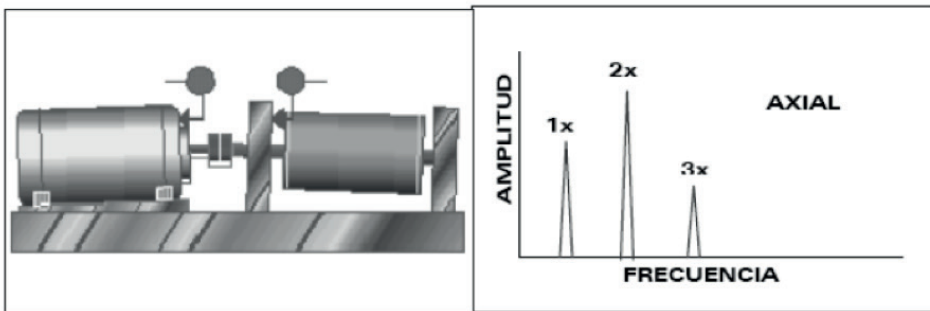
Máquina nueva	Máquina usada
Mala cimentación	Daño cimentación
Mala instalación (pata suelta)	Fallas sujeción (pata suelta)
Mala selección o instalación de sistemas de amortiguación (resortes, absorbedores de vibración)	Daños en resortes, absorbedores, tornillería
Mala alineación al momento de montar	Desalineación por soltura mecánica (tornillería o elementos de sujeción)
Piezas nuevas y desbalanceadas	Piezas que se desbalancean por suciedad, golpes, pérdidas de material, reparaciones indebidas, etc.
Ejes con elementos excéntricos	Malas reparaciones que generan excentricidades
Elementos rodantes nuevos deteriorados por mal montaje	Elementos rodantes defectuosos o mal lubricados.
Tolerancias de mecanización indebidas	Tolerancias de mecanización indebidas durante reparaciones. Desajustes por desgaste paulatino
Vibración y ruido por soltura mecánica entre piezas que se mueven relativamente entre sí	Vibración y ruido por soltura mecánica entre piezas que se mueven relativamente entre sí

4.4.1. Algunos términos y definiciones

Desalineación (Figura 57). No colinealidad entre los ejes de dos máquinas que se acoplan y transmiten movimiento axialmente. La desalineación puede ser angular, paralela o combinada. Se corrige con equipos para alineamiento para maquinaria. La alineación es una técnica con sus equipos y métodos propios.

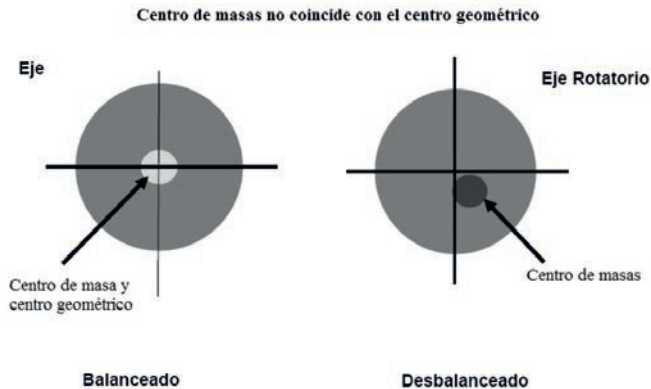
Figura 57. Desalineación angular y espectro de vibración asociado

Tomado de [35]



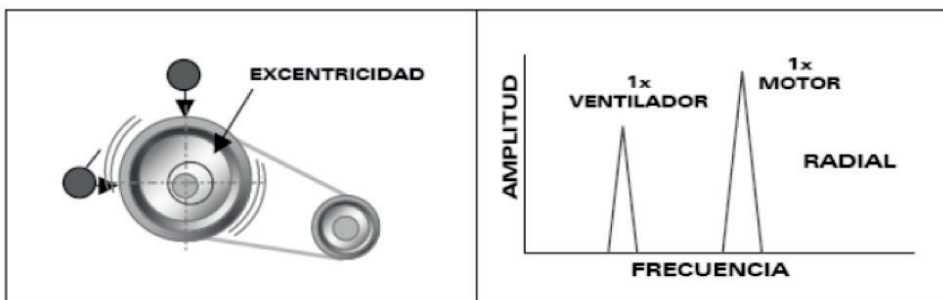
Desbalanceo (Figura 58). No distribución homogénea de la masa de un cuerpo rotatorio. No coincidencia del centro de masas con el centro geométrico de la pieza. Se corrige, bien sea adicionando una masa m , a 180° de donde se determinó que está la concentración indebida de masa, o mecanizando (retirando) la masa anormal (poco usual). Al igual que la alineación, el balanceo es una técnica con sus equipos y métodos propios.

Figura 58. Esquema de una pieza balanceada y una desbalanceada
Tomado de [35]



Excentricidad (Figura 59). No coincidencia de las líneas de centros de los ejes de rotación de la pieza y de la maza (polea, piñón, volante de inercia, etc.); en otras palabras, defecto geométrico de concetricidad. La excentricidad se puede corregir por mecanizado o con el recambio de la pieza (polea, piñón, catalina, *sprockets*, etc.).

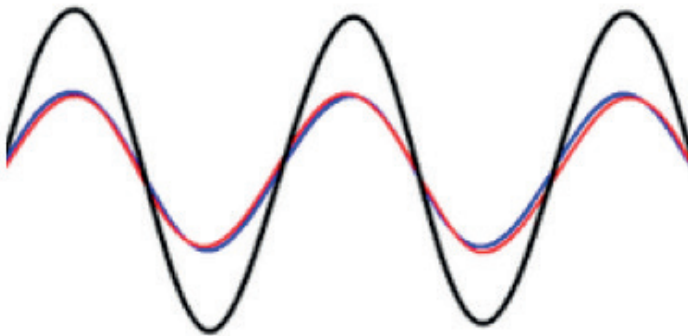
Figura 59. Excentricidad y espectro de vibración asociado. Tomado de [35]



Soltura mecánica. Fenómeno causante de vibración y ruido, originado por tornillería (o elementos de fijación) suelta, rota o faltante, en la estructura de una máquina. Puede aparecer como efecto del trabajo normal de la máquina o como consecuencia de otros fenómenos (desalineación, desbalanceo, etc.). Para corregir la soltura mecánica se recambia o aprieta la tornillería suelta, faltante o defectuosa, esto en el caso de que sea causada por la operación normal del equipo, en caso contrario es necesario corregir las otras causas primero.

Resonancia (Figura 60). Fenómeno por el cual se igualan las frecuencias de oscilación natural de un sistema (estando la máquina/equipo en reposo) y la frecuencia forzada (en operación). La ocurrencia de este fenómeno es sumamente nociva, porque las amplitudes de ambas ondas se suman y pueden llevar a la destrucción del sistema.

Figura 60. Resonancia y espectro de vibración asociado
Tomado de [3]



Fenómeno de pata suelta. Fenómeno por el cual algunos de los puntos de apoyo (patas) de la base de una máquina (motor eléctrico, torno, reductor, etc.) no son coplanarios. En la Figura 61 se aprecia la situación esperada en cuanto a coplanicidad y esfuerzos de la máquina si no hay “pata suelta”, es decir, las líneas se aprecian horizontales y no se aprecian claros u holguras con respecto a la base.

En la Figura 62.a se aprecia la existencia de un claro u holgura, el cual técnicamente debería ser copado o calzado o suplido con laines o shims, equivalentes a dicha luz u holgura. Si mecánico aplica el par de apriete sin calzar, la estructura se deformará y pretensionará (y en el peor de los casos podría romperse el apoyo al tratarse de fundición), tal como se aprecia en la Figura 62.b. Este error aparentemente tan trivial, es una fuente importante de vibraciones.

Figura 61. Estado adecuado de coplanicidad de las patas Tomado de [36]

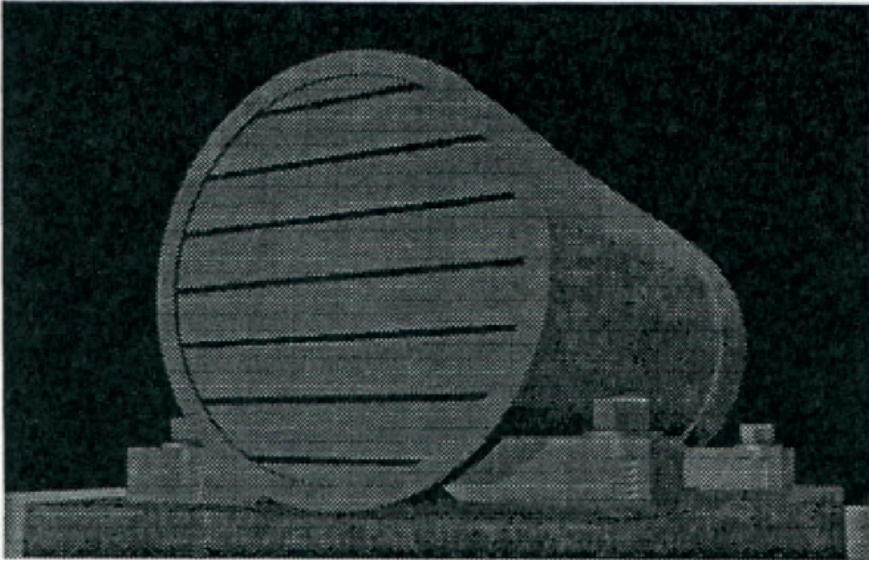
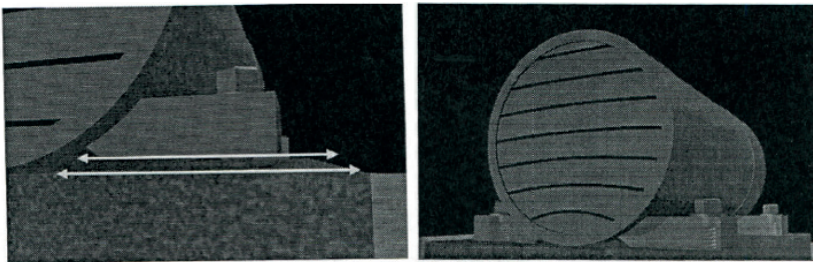
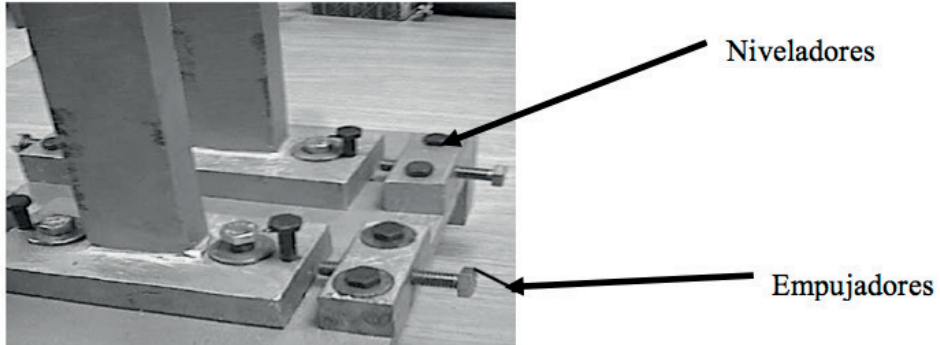


Figura 62. a) Claro u holgura causante de la pata suelta. b) Estructura deformada y esforzada, debido a la pata suelta Tomado de [36]



Niveladores y empujadores (Figura 63). Elementos propios de una estructura/bastidor bien concebida, y que permiten elevarla/descenderla en un plano vertical, o correrla adelante/atrás, en un plano horizontal. Los niveladores y empujadores son vitales para un fácil y adecuado alineamiento de una pareja de máquinas/equipos.

Figura 63. Bastidor de máquina/equipo con niveladores y empujadores
Tomado de [35]



4.4.2 Efectos de las vibraciones

Las vibraciones excesivas pueden tener efectos adversos en el personal, el equipo y las estructuras.

Personas.

El ruido que generan es incómodo, pueden alterar su estado de ánimo (mal genio, estrés, nerviosismo), pueden interferir con su habilidad para hacer algo o concentrarse en tareas mentales, pueden hacer difícil que la gente efectúe movimientos precisos o que efectúen lecturas correctas de los instrumentos y, en casos extremos, pueden conducir a la inhabilidad física (enfermedad de *Raynaud* o dedos blancos causado por los compresores de romper carreteras,) y a accidentes laborales.

Máquinas y equipos

Puede reducir la vida de sus componentes (rodamientos, chumaceras), sobre todo aquellos con cargas muy grandes o velocidades altas. Las herramientas de las máquinas sujetas a vibraciones excesivas producen malos acabados. Algunos equipos de precisión (sistemas ópticos, microscopios, calibradores) no pueden ser utilizados adecuadamente en presencia de vibraciones.

Estructuras.

Los esfuerzos oscilatorios inducidos en las conexiones de las estructuras de construcción (puentes, edificios) y conexiones mecánicas (tornillos de sujeción, tubería, cables, soldaduras) tienden a producir fallas en estos dispositivos debido

a fatiga estructural. La vibración afloja tornillos conduciendo gradualmente al desajuste general de la máquina. En casos puntuales de combinación de vibración y resonancia, se puede llegar al caso extremo de fatiga y falla catastrófica de las estructuras (civiles o mecánicas).

Cabe anotar que no siempre la vibración es nociva, existen industrias y equipos en las que la vibración es deseable y necesaria, por ejemplo, las cribas o zarandas son indispensables en la industria alimenticia para clasificar granos (molidos o naturales) de acuerdo a su tamaño o granulometría, lo mismo que en Trituración de agregados, producción de cemento, fabricación tubos de cemento, vibradores para limpieza de tolvas, etc. En estas industrias lo que hay que garantizar es que los equipos vibren acorde a unos ciertos valores de frecuencia y amplitud.

4.4.3 Medición y control de la Vibración

Medición. En control de vibración, lo que hay que garantizar no es que no haya vibración (puesto que físicamente es imposible), sino que ella no supere ciertos montos. Los valores de vibración que se consideran aceptables son determinados por normas. La Tabla 19 presenta los límites permisibles de vibración, de acuerdo con la Norma ISO 10816-1995, expresada en mm/s.

Tabla 19. Criterio provisional de vibración para un grupo específico de máquinas según la norma ISO 10816 – 1995 Tomado de [37]

Velocidad de vibración valor eficaz RMS (mm/s)	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,28	Normal	Normal	Normal	Normal
0,45				
0,71				
1,12	Admisible	Admisible	Admisible	Admisible
1,8				
2,8	Límite	Límite	Límite	Límite
4,5				
7,1	No permisible	No permisible	No permisible	No permisible
11,2				
18				
28				
45				

Nota: El valor eficaz o RMS (*Root Mean Square*), es el valor de una onda variable, que produce el mismo efecto (en potencia), que su equivalente en onda continua o directa.

Clase I: Componentes individuales de máquinas y motores, íntegramente conectado a la máquina completa, con condiciones normales de operación, motores de potencia menor a 15 kW.

Clase II: Máquinas de dimensión mediana, motores entre (15 – 75) kW sin cimentación especial; máquinas hasta 300 kW con soporte especial.

Clase III: Máquinas grandes con inercias giratorias instaladas en cimientos rígidos y pesos que son relativamente rígidos en la dirección de la medición de la vibración.

Clase IV: Máquinas grandes que operan a velocidades superiores a la velocidad crítica o a la frecuencia natural.

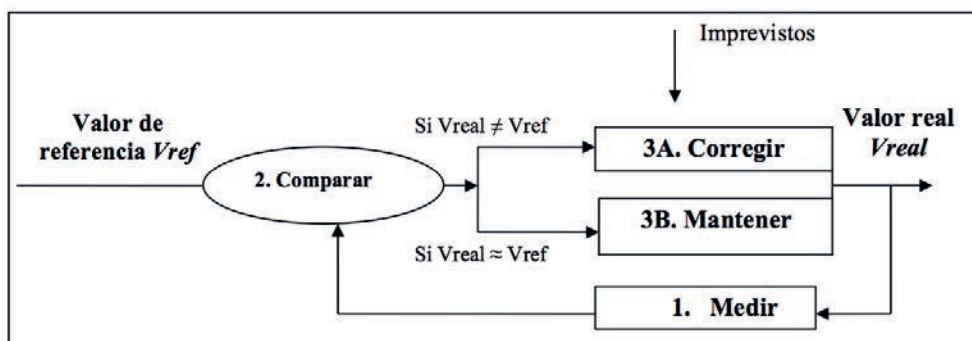
La medición de vibraciones se puede llevar a cabo con medidores portátiles tipo bolsillo (para mediciones puntuales, sin representación del espectro de onda) o con equipos de arquitectura más compleja (medición, acondicionamiento de señales, procesamiento de información y presentación de información al usuario) como el DSP *Logger MX 300* (Figura 64) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UTP. Un equipo de estos convenientemente utilizado determinará si la fuente de vibración es por desbalanceo, por desalineación, por soldadura mecánica, por elemento rodante defectuosos, etc., con lo cual se pasará a programar los correctivos necesarios (balanceo, alineación, apriete, lubricación, cambio de elementos rodantes, etc.).

Figura 64. Equipo para medición y análisis de vibraciones UTP. Tomado de [3]



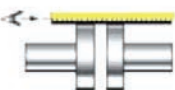
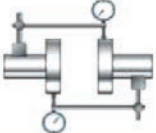
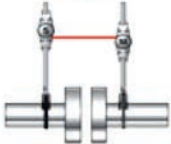
Corrección de la Vibración. En vibración también se cumple la *Ley de Pareto* condensada en el postulado: El 80% de los problemas de vibración se originan en el 20% de las causas, representadas en *problemas de alineación de ejes*. El otro 80% de las causas se distribuyen en: desbalanceo, excentricidades, elementos rodantes defectuosos, problemas de lubricación, piezas sueltas, tolerancias de mecanización indebidas, desajustes excesivos, partes mal aseguradas, etc. Es evidente entonces que, si una empresa posee sus equipos bien alineados, indirectamente está resolviendo el 80% de los problemas de vibraciones (y los sobrecostos asociados a ellas). La metodología general de la medición y control de las vibraciones es la descrita en la Figura 65, siguiendo el orden cardinal referenciado allí.

Figura 65. Dinámica general de la medición y control de vibraciones



Corrección de la desalineación. Existen diversos métodos para alinear ejes, pero los más utilizados son los presentados en la Figura 66, es decir, regla de precisión, comparadores invertidos y alineación láser. Cada uno de los métodos anteriores posee sus potencialidades y limitaciones, en cuanto a exactitud, simplicidad, costo de implementación y capacitación del personal a cargo.

Figura 66. Comparación de los métodos de alineación. Tomado de [35]

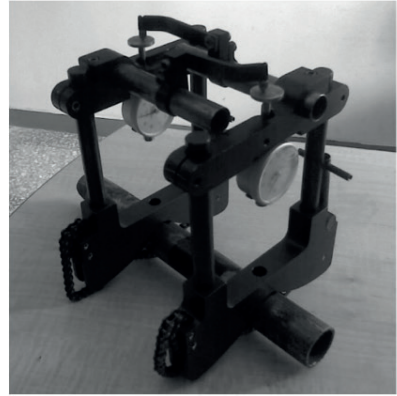
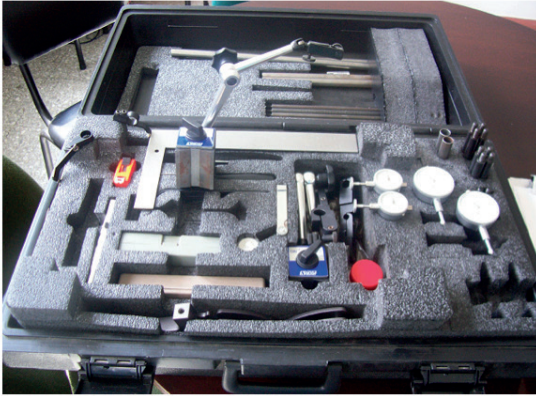
Método	Regla de precisión 	Comparadores invertidos 	Láser 
Entrenamiento requerido por el operador	Años de experiencia. “El mago”	Semanas o meses. Un especialista	Unas pocas horas. Cualquier persona
Facilidad de ejecución	Alta	Baja	intermedia
Tiempo de ejecución	Muy bajo	Muy alto	Bajo
Calidad de la alineación	Máximo 4 mils en 10 mm	Máximo 0,4 mils en 100 mm	Máximo 0,04 mils en 1000 mm

La Figura 67 presenta un esquema básico del montaje real de los comparadores invertidos, realizado con equipo *Update International* de la UTP.

Sin importar cuál de los tres métodos se aplique, durante un proceso de alineamiento se debe seguir este orden:

- Verificar estado de absorbedores, tornillería, acoples. Cambiar en caso de ser necesario.
- Corregir pata suelta (utilizar comparadores de carátula para medirla y adicionar laines, espaciadores o *shims*).
- Pre-alinear (utilizar niveladores y empujadores).
- Corregir desalineación angular y corregir desalineación paralela (combinada)
- Medir y mantener

Figura 67. Equipo de alineamiento por el método de los comparadores invertidos Tomado de [36]



Corrección del desbalanceo. Primeramente, se deben tener claros la potencia y velocidad de operación de la máquina/equipo en estudio. Con un equipo del estilo del *DSP Logger* (mostrado en la Figura 62) se debe hacer un montaje como el mostrado en la Figura 66. Se debe hacer una medición de la vibración inicial del sistema, y comparar contra los valores de la *tabla 18*; seguidamente se adiciona una masa de prueba y nuevamente se mide, con lo cual internamente el equipo hace cálculos e indica cuánta masa se debe adicionar y en qué fase (ángulo con respecto a un punto de referencia). Esta descripción es por supuesto muy simple y somera, en mayor profundidad sería necesario tomar un curso o Seminario de Vibraciones mecánicas o consultar a mayor profundidad las referencias [35, 37, 38].

En la Figura 68 se aprecia que se hace uso de dos acelerómetros, lo cual coincide con un *balanceo en dos planos*. La tabla 20 ilustra los criterios necesarios para decidir si se aplica balanceo estático o en un plano (con un solo acelerómetro), en dos planos o dinámico (con dos acelerómetros) o en múltiples planos.

Figura 68. Montaje en máquina balanceadora, para realizar balanceo en dos planos de un ventilador Tomado de [3]

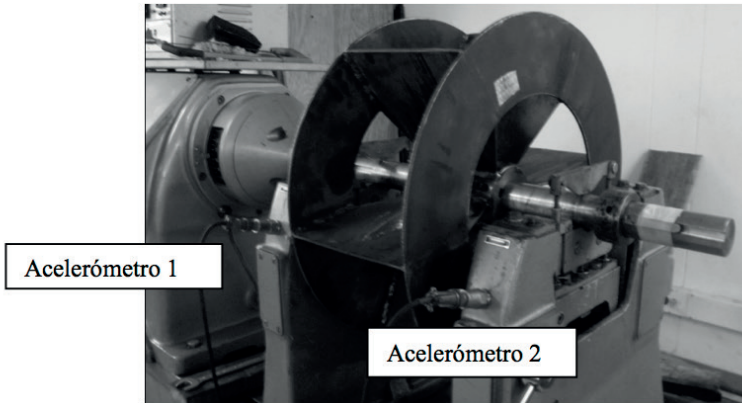


Tabla 20. Modelos para balanceo Tomado de [37]

Modelo Rotor	Relación L/D	Modelos de balanceo		
		Un plano	Dos planos	Múltiples planos
	Menor que 0,5	Hasta 1000 min^{-1}	Superior a 1000 min^{-1}	
	Mayor que 0,5 y menor que 2,0	Hasta 150 min^{-1}	150 min^{-1} a 2000 min^{-1} Superior a 70% Vel. crítica	Superior a 2000 min^{-1} Superior a 70% Vel. crítica
	Mayor que 2,0	Hasta 100 min^{-1}	Superior a 100 min^{-1} Hasta el 70% Vel. crítica	Superior a 70% Vel. crítica

Nota: La *velocidad crítica* en ejes rotatorios, es aquella para la cual ocurre su máxima deformación, debido a su peso propio (eje sin carga externa) y por efectos de la velocidad angular. Existen tantas velocidades críticas como grados de

libertad (masas) posea el eje. El cálculo más trivial de la primera velocidad crítica (regularmente la más importante) se efectúa con la fórmula 13. Para cálculos más completos de las velocidades críticas existen los Métodos de: *Rayleigh*, de la Fórmula de frecuencias y de *Dunkerley*.

$$f_n = \sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{\frac{g}{\delta}} \quad (13)$$

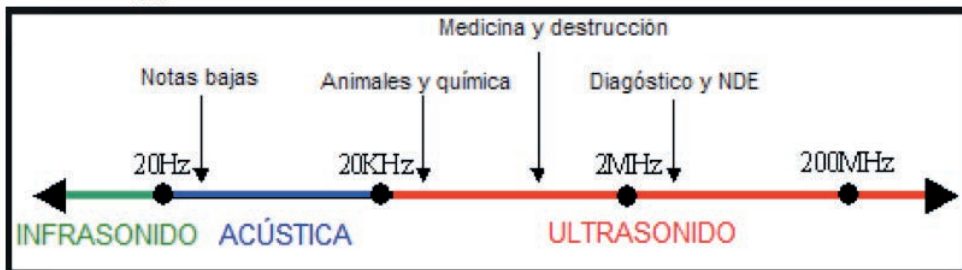
Donde,

- f_n es la frecuencia natural del sistema rotacional;
- K es la constante de rigidez del sistema rotacional;
- m es la masa del sistema rotacional;
- g es la constante gravitacional;
- δ es la deformación del eje.

4.5 Ensayo de Ultrasonido (técnica de inspección volumétrica)

El oído humano percibe sonidos cuyas frecuencias estén comprendidas entre los 20Hz hasta 20 kHz; por encima de dicho límite se denominan ultrasonidos. En la Figura 69 se puede apreciar la frecuencia del ultrasonido y sus aplicaciones:

Figura 69. Rangos de ultrasonido. Tomado de [3]



La inspección por Ultrasonido Industrial se define como un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico, que se basa en la impedancia acústica IA, es decir, la velocidad máxima de propagación del sonido en el material en estudio, multiplicada por la densidad del material.

Los equipos de ultrasonido que se emplean actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas, dependiendo del tipo de

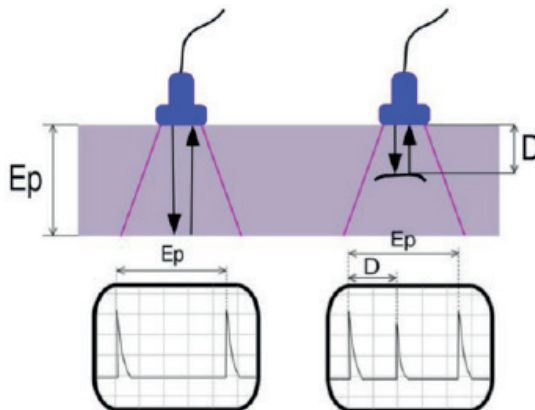
transductor utilizado y de las frecuencias que se seleccionen dentro de un ámbito de 0,25 hasta 25 MHz [3, 34].

Las ondas ultrasónicas son generadas por un cristal o un cerámico piezoeléctrico dentro del transductor; el transductor tiene la propiedad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Al ser excitado eléctricamente y por el efecto piezoeléctrico, el transductor vibra a altas frecuencias, generando el ultrasonido; estas vibraciones son transmitidas al material que se desea inspeccionar. Durante el trayecto en el material, la intensidad de la energía sónica sufre una atenuación, que es proporcional a la distancia del recorrido. Cuando el haz sónico alcanza la frontera del material, es reflejado. Los ecos o reflexiones del sonido son recibidos por otro (o por el mismo) elemento piezoeléctrico y su señal es filtrada e incrementada para ser enviada a un osciloscopio de rayos catódicos, en donde la trayectoria del haz es indicada por las señales de la pantalla; también puede ser transmitida a un sistema de graficación, donde se obtiene un perfil acústico de la pieza a una pantalla digital, donde se leerá un valor o a una computadora, para el análisis matemático de la información lograda. En muchos aspectos la onda de ultrasonido es similar a las ondas de luz; ambas son ondas y obedecen a una ecuación general de onda [3, 34].

En ultrasonido hay 2 técnicas generales de inspección, de contacto y por inmersión.

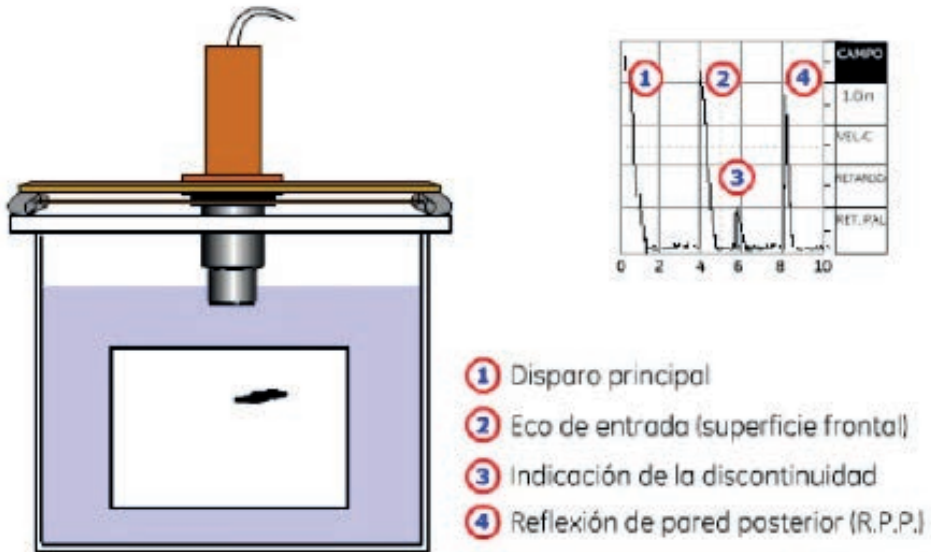
De Contacto. El transductor (con un fluido acoplante) se coloca directamente sobre pieza a inspeccionar (Figura 70)

Figura 70. Esquema básico de inspección por contacto. Tomado de [34]



De inmersión (Figura 71). Tanto la pieza a inspeccionar y el transductor quedan sumergidos en el medio acoplante (agua)

Figura 71. Esquema básico de inspección por inmersión
Tomado de [34]



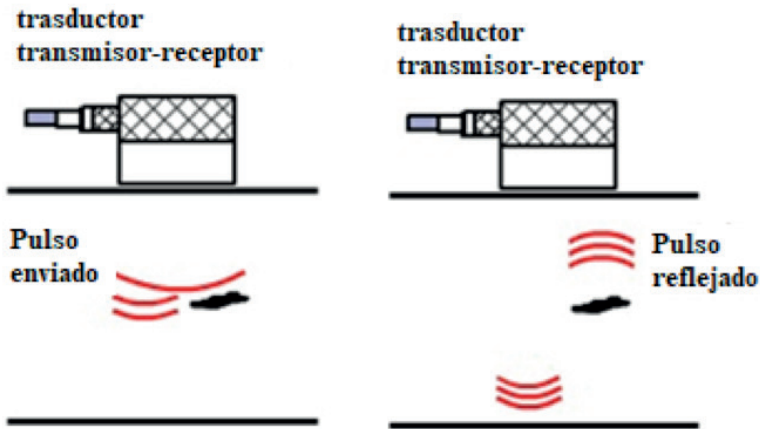
- ① Disparo principal
- ② Eco de entrada (superficie frontal)
- ③ Indicación de la discontinuidad
- ④ Reflexión de pared posterior (R.P.P.)

Desde el punto de vista de cómo se aplica y maneja la información de la energía sónica, los ultrasonidos se clasifican en:

- Pulso eco (impulsos) o reflexión
- Onda continua (transparencia)

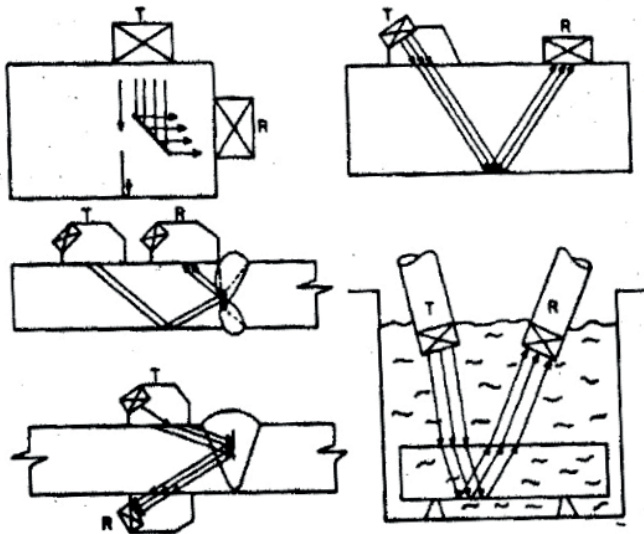
Pulso eco (impulsos) o reflexión. La energía ultrasónica se envía en impulsos cortos (Figura 72). El tiempo que tarde en recibirse la energía reflejada en la discontinuidad o en la pared posterior, determinará la distancia a la cual se encuentra esta.

Figura 72. Aplicación del método pulso eco, por contacto directo
Tomado de [34]



Onda continua (transparencia). En esta técnica, la energía ultrasónica es un pulso continuo, y lo que se mide es la atenuación o pérdida de energía acústica conforme las ondas se desplazan a través de zonas específicas de un material (Figura 73). Se aplica a materiales acabado burdo, soldaduras o materiales con atenuación elevada.

Figura 73. Aplicación del método onda continua, por contacto directo y por inmersión. Tomado de [34]



Las indicaciones, marcas de salida, defectos o discontinuidades obtenidas de la pieza pueden ser representadas de tres maneras diferentes:

- Barrido tipo A (A-Scan)
- Barrido tipo B (B-Scan)
- Barrido tipo C (C-Scan)

Barrido tipo A (A-Scan). Gráfico de amplitud versus Tiempo (usualmente en técnica de contacto directo). La presencia de discontinuidades es representada por medio de ecos, picos, reflexiones o indicaciones sobre la pantalla (parte derecha de la Figura 79)

Barrido tipo B, (B-Scan). Gráfico bidimensional (generalmente utilizado en la técnica de inmersión). La pantalla está recubierta con un fosforo especial que permite retener la imagen de la sección transversal de la pieza inspeccionada, permitiendo que se observe perfectamente delineada por una serie de puntos luminosos orientados en la misma dirección del barrido (Figura 74).

Barrido tipo C (C-Scan). Gráfico tridimensional (generalmente en técnica de inmersión). Muestra una vista superior en forma de mapa, similar a una imagen radiográfica. En la pantalla se muestra la proyección de los detalles internos, si existe una discontinuidad se obtiene el contorno de esta (Figura 75).

Figura 74. Representación típica en B-San. Tomado de [34]

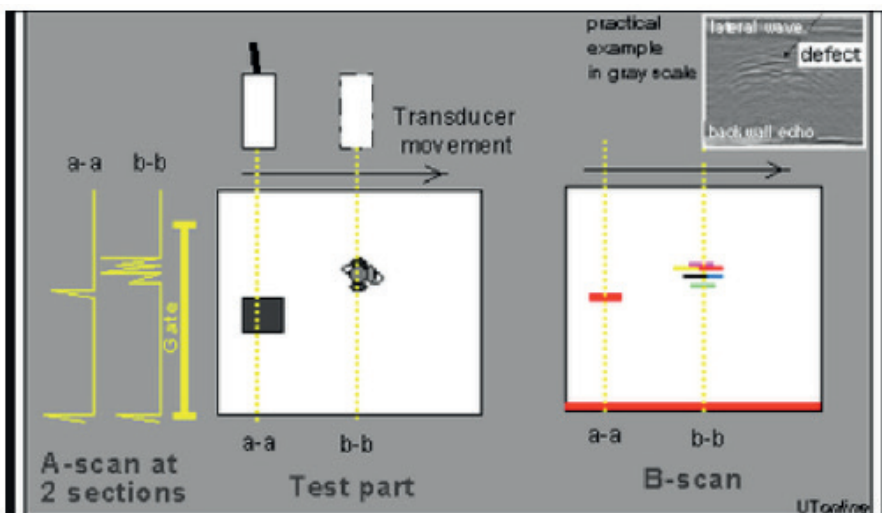
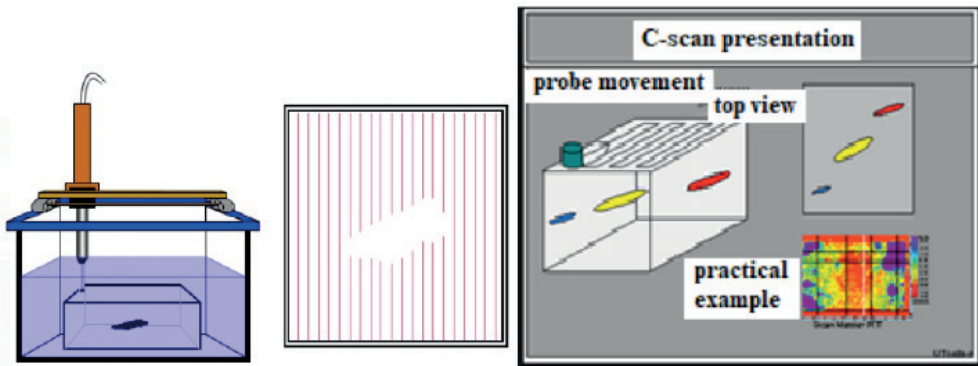


Figura 75. Representación típica en C-San. Tomado de [34]



La mayoría de los sistemas de inspección ultrasónica operan bajo el principio onda – eco, cuyo procedimiento general se enuncia a continuación:

- Antes de iniciar un proceso de inspección o medición se debe efectuar un proceso de calibración. El ensayo ultrasónico es un método de inspección por comparación, es decir, las indicaciones de las discontinuidades son comparadas con las indicaciones obtenidas en los patrones de referencia. Los bloques patrones (Figura 79) son usados para estandarizar la calibración del equipo y evaluar en forma comparativa las indicaciones obtenidas de la pieza de ensayo.
- Un generador electrónico de señales produce pulsos eléctricos de corta duración.
- Se aplica acoplante entre el palpador y la superficie a inspeccionar. El acoplante es un fluido que garantiza contacto entre el palpador y la superficie (reduce la atenuación debida a la rugosidad superficial)
- Un palpador (transductor) dual o no, emite el haz de ondas ultrasónicas cuando recibe los pulsos eléctricos.
- El palpador recoge la reflexión del pulso ultrasónico y las convierte en pulsos eléctricos.
- La información de pulsos eléctricos es entregada a un dispositivo electrónico para amplificar y si es necesario, desmodular o de otra manera modificar las señales del transductor.

- Un dispositivo de despliegue para indicar las indicaciones o marcas de salida de la pieza de prueba, el dispositivo puede ser un tubo de rayos catódicos (TRC), pantalla electroluminiscente o de cuarzo líquido.
- Un reloj electrónico o contador (*timer*) para controlar la operación de los componentes del sistema, para servir como punto de referencia primario, y para proporcionar coordinación del sistema completo.

En la Figura 76 se muestra un equipo el Equipo Panametrics EPOCH XT de la Universidad Tecnológica de Pereira, el cual opera bajo la técnica de contacto directo, por pulso - eco y representa la información por el método A-Scan.

Figura 76. Equipo Panametrics EPOCH XT, detector de discontinuidades por ultrasonido Tomado de [3]



El ultrasonido en mantenimiento se utiliza para:

- Medición de espesores de materiales (Figura 77)
- Evaluación de corrosión, con el fin de determinar la vida remanente o residual de recipientes a presión o tuberías
- Inspección de materiales, detectando defectos o discontinuidades internas (Figura 78)
- Verificación de calidad de soldadura (Figura 79). Es una operación muy

exigente que implica desarrollar procedimientos dados por normas como por ejemplo, *AWS D1.1/D1.1M2015*

Figura 77. Aplicación de ultrasonido para medición de espesores
Tomado de [3]

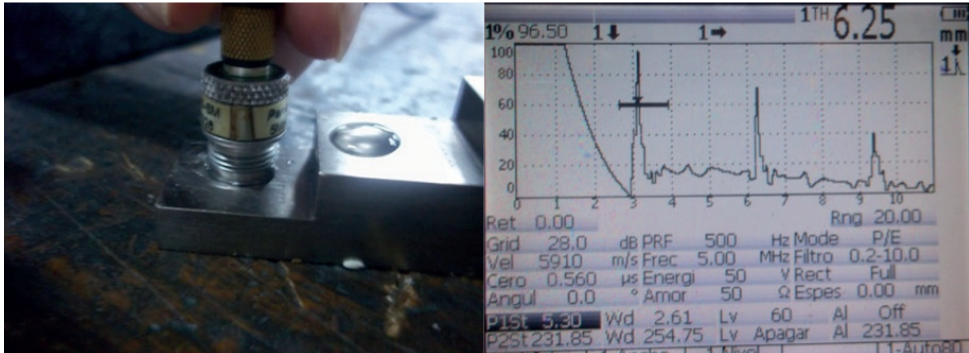


Figura 78. Aplicación de ultrasonido para detección de defectos o discontinuidades. Tomado de [3]



Ventajas del ultrasonido. A continuación, se describen algunas de las ventajas del ultrasonido industrial:

- Se detectan discontinuidades superficiales y subsuperficiales.
- Puede delimitarse claramente el tamaño de la discontinuidad, su localización y su orientación.
- Solo se requiere acceso por un lado del material a inspeccionar.
- Tiene alta capacidad de penetración y los resultados de prueba son conocidos inmediatamente.

Figura 79. Aplicación de ultrasonido para evaluar calidad de la soldadura
Tomado de [39]



Limitaciones del ultrasonido. A continuación, se describen algunas de las limitaciones más significativas del ultrasonido industrial:

- Está limitado por la geometría, estructura interna, espesor y acabado superficial de los materiales sujetos a inspección.
- Localiza mejor aquellas discontinuidades que son perpendiculares al haz de sonido.
- Las partes pequeñas o delgadas son difíciles de inspeccionar por este método.

- El equipo puede tener un costo elevado, que depende del nivel de sensibilidad y de sofisticación requerido.
- El personal debe estar calificado y generalmente requiere de mucho mayor entrenamiento y experiencia para este método que para cualquier otro de los métodos de inspección.
- La interpretación de las indicaciones requiere de mucho entrenamiento y experiencia de parte del operador.

4.6 Análisis de aceites en uso

En esta técnica específica se toman muestras de aceite que ha sido usado, se llevan a un laboratorio y se hacen valoraciones de viscosidad, índice de viscosidad, contenidos de metales, y se comparan contra unos valores de referencia. Básicamente, la comparación y análisis puede indicar alguna de las siguientes situaciones:

- El aceite puede seguir en uso (la frecuencia de cambio puede conservarse o podría ampliarse).
- El aceite no puede seguir en uso, está muy contaminado o degradado (oxidado, con nitración o con pérdida de efectividad del aditivo). Puede ser necesario revisar la frecuencia de cambio.
- Se puede inferir el estado superficial interno del componente en estudio (motor de combustión o compresor) y programar acciones en caso de ser necesario.

Los análisis de aceites en uso se aplican a cárteres de motores diesel, compresores, turbinas a vapor, transformadores de potencia. La Figura 80 presenta un esquema típico de toma de la muestra en un motor diesel. El proceso de toma de muestra indica una serie de recomendaciones y precauciones, para evitar su contaminación:

- Tomar la muestra cuando el equipo haya estado en funcionamiento previo.
- Tomar la muestra siempre en el mismo punto
- Evitar tomar la muestra en puntos muertos (de difícil circulación)
- El punto de toma de la muestra debe estar limpio
- Utilizar recipientes limpios y secos

- Identificar adecuadamente la muestra: equipo, n° de parte, marca, nombre y grado del compartimiento, fecha y horas/km de operación

El análisis de aceite determina la viscosidad @ 100°C, análisis Infrarrojo (Oxidación, Nitración, Sulfatación, Agua, Hollín, Glicol), contenido de metales. Los metales en los aceites provienen de tres fuentes: desgaste interno, por contaminación externa con polvo o aditivos refrigerantes, de los metales de los aditivos. Algunos metales comunes de desgaste y su fuente son los descritos a continuación.

Desgaste del motor:

Hierro : Cilindros, Anillos, Tren de Válvulas, Camisas,

Herrumbre

Cromo : Anillos

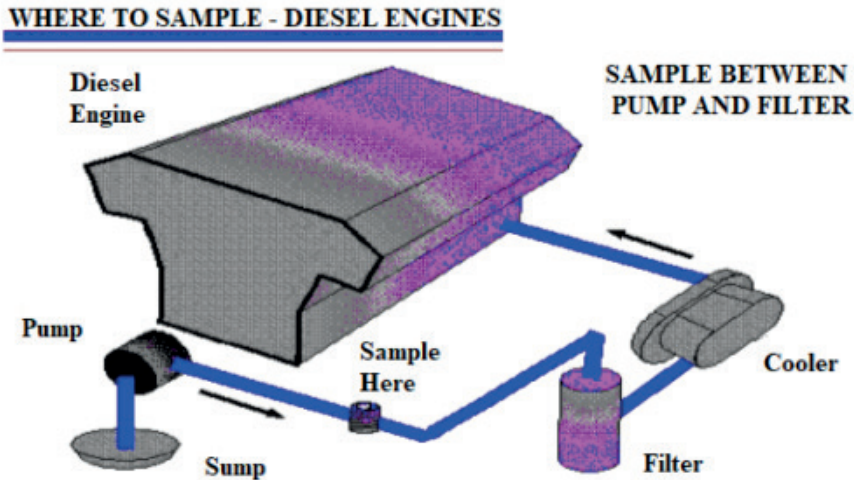
Aluminio : Pistones, Polvo

Plomo : Cojinetes

Cobre : Cojinetes, Enfriador de Aceite

Estaño : Cojinetes

Figura 80. Esquema típico de toma de muestra de aceite para análisis, en un motor de combustión interna Tomado de [40]



Contaminantes comunes:

- Silicio** : Arena, polvo
- Sodio** : Salinidad del agua de mar, aditivo refrigerante
- Boro** : Aditivo refrigerante
- Cromo** : Aditivo refrigerante

Elementos comunes de aditivos:

- TBN / Detergentes:** Calcio, Magnesio, Sodio.
- Antioxidante / Antidesgaste:** Zinc, Fósforo, Cobre, Molibdeno.
- Antiespumante:** Silicio.
- Dispersantes:** Nitrógeno, Boro.

La Tabla 21 (Tomado de [41]) presenta un listado indicativo de valores permisibles máximos de viscosidad, agua, metales y otros. Los valores indicados para los metales con en partes por millón (ppm).

Tabla 21. Valores permisibles máximos de viscosidad, agua, metales y otros

Motora a gasolina	100	40	40	40	40	40	40	40	40	20	20						0,7	0,3	0,3	0,45	0,2	(50-25) %	35%	
Motora diesel comerciales	100	40	100	40	20	40	40	40	40	20	20						50	0,7	0,3	0,45	0,2	(35-25) %	25%	
Motora diesel ferrocarril	100	20	100	100	20	40	40	40	40	10	40	2					100	0,7	0,3	0,45	0,2	(25-15) %	10%	
Motora estacionarios	100	40	100	40	40	40	40	40	40	20	20						75	0,7	0,3	0,45	0,5	(35-25) %	25%	
Motora a gas	100	40	40	40	40	40	40	40	40	10	10						75	0,7	0,3	0,45	0,1	50 %	25%	
Transmisiones (cajas)	500	10	300	300	20	100	20	10	10	40	20	10					75	0,35			0,3		Fuera grado	
Hidráulicos	75	10	20	50	10	50	5	5	5	20	20	20					75	0,15			0,2	Fuera grado		
Diferenciales	750	10	100	400	30	50	10	25	10	75	10	50					50	0,35			0,3	Fuera grado		
Reductores indust.	500	10	300	300	20	100	20	10	10	40	20	75					75	0,35			0,3	(10-25) %	Fuera grado	
Turbogeneradores	50	10	20	40	15					20	20							0,1			0,2	Fuera grado		
Bomba de lodos																		0,35			0,3			
Caja automática	100	10	50	100	50	20				20	20							0,3			0,2		Fuera grado	
Motor de avión a pistón	5		10	3	10	10				10	10	0,15						0,1	0,15	0,15	0,2		Fuera grado	
Compresor	50	10	20	40	15					20	20							0,3			0,3			
Sistema térmico																		0,1	0,15		0,2		(10-25) %	
Frenos húmedos	100	5	75			10				20	20													
Mando final	350	5	10	8						30	30							0,12		0,08	0,3		25%	
Servotransmisión	100	5	75			10				20	20													
Motora diesel 2T	140	15	100	25	25	15				20	20							0,7	0,3	0,3	0,45	0,2	(10-25) %	
Sistema de refrigeración	50	10	20	40	15	10				20	20										0,2	Fuera grado		
Sistema diesel ST electrónico	100	40	100	40	20	40				20	20							0,2	0,3	0,3	0,3	(35-25) %	25 %	

4.7 Industria 4.0, fábrica inteligente y e-Maintenance

Dado el auge que en el mundo viene tomando el concepto de la industria 4.0 y el consecuente mantenimiento asociado a ella y, a pesar de que en Colombia aún son temas y prácticas novedosas, se hace necesario realizar una breve descripción de ellas, con el fin de que los noveles ingenieros y tecnólogos tengan un conocimiento meridiano de su esencia, y de lo que en un futuro no muy lejano podrían enfrentarse, tanto en la realidad nacional como internacional.

4.7.1 Industria 4.0

Grosso modo, en la Inglaterra de finales del siglo XVIII, ocurrió la primera revolución industrial, en la cual a partir de la energía producida con vapor y agua, se propició la mecanización; en USA de finales del siglo XIX, la segunda revolución industrial con el uso de la electricidad y el impulso del uso de la línea de ensamblaje, se llegó a la producción industrial masiva; de nuevo en USA del siglo XX (hacia 1960) y con el auge de la computación, la tercera revolución industrial propició la automatización de los procesos de producción; en la Alemania de la segunda década del siglo XXI, y con base en la internet y la conectividad, la cuarta revolución industrial o industria 4.0 ha creado máquinas y fabricas inteligentes.

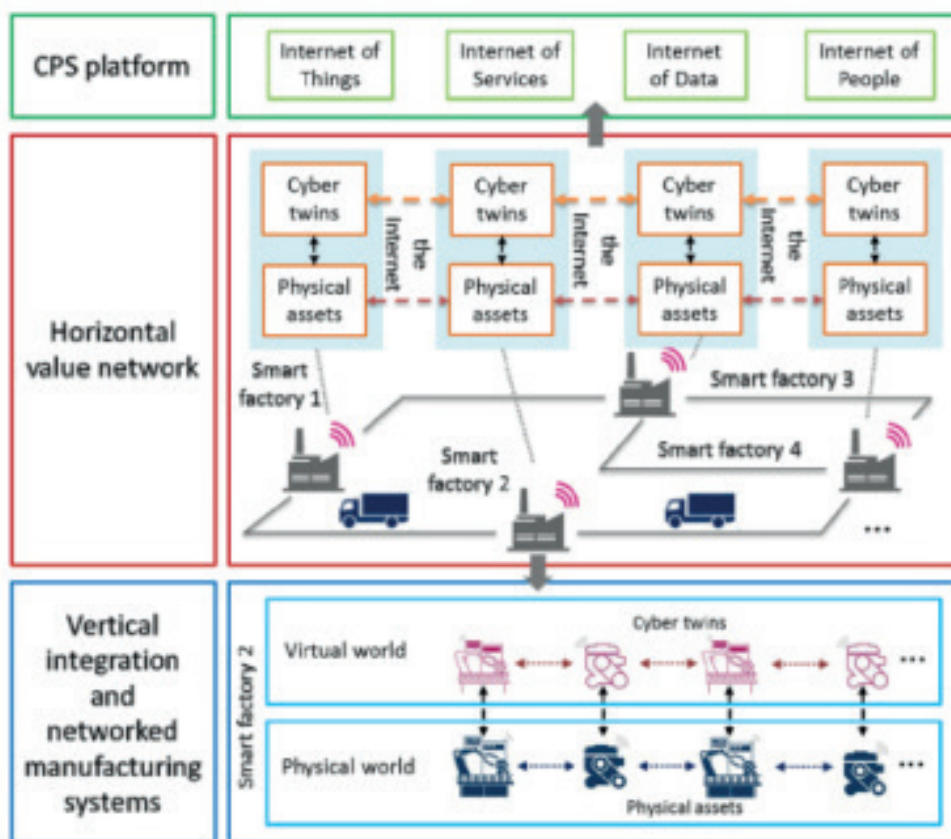
La industria 4.0 o cuarta revolución industrial es el resultado de un mundo interconectado y constantemente cambiante, en el que las necesidades personalizadas de los clientes pueden ser tenidas prontamente en cuenta. La industria 4.0 abarca el ciclo completo de vida del producto (*Product Lifecycle Management*), desde la idea, el pedido, el desarrollo, la producción, la entrega al cliente final, el reciclaje y los servicios relacionados.

El concepto de Industria 4.0 fue introducido en 2011 por *Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas, Wolfgang Wahlster* en su texto "*Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*" (Industria 4.0: Con el Internet de las cosas, de camino a la 4ª revolución industrial) [42]. En éste, se describe cómo la industria alemana encamina sus esfuerzos de producción, a la comunicación entre el plano físico y el ciberespacio (*Cyber Physical-System CPS*).

En la industria 4.0 las máquinas están conectadas a internet y cada parte del proceso de producción industrial se intercomunica con las otras, para adaptarse a las circunstancias cambiantes y conseguir en todo momento el máximo rendimiento. Los parámetros físicos y de operación constantemente se están midiendo constantemente, de manera automática, y parte de dichas mediciones se aprovechan para el mantenimiento de la industria 4.0.

La Figura 81 ilustra la arquitectura general de la industria 4.0, en donde es recurrente el concepto de cadena de valor. La elaboración e implementación de soluciones de Industria 4.0, se centra en las tres siguientes funciones generales y al mismo tiempo priorizan las áreas de acción: Integración horizontal a través de redes de valor, Integración digital de extremo a extremo de la ingeniería en toda la cadena de valor e Integración vertical y sistemas de fabricación en red [43].

Figura 81 Principio de la industria 4.0 Tomado de [1]



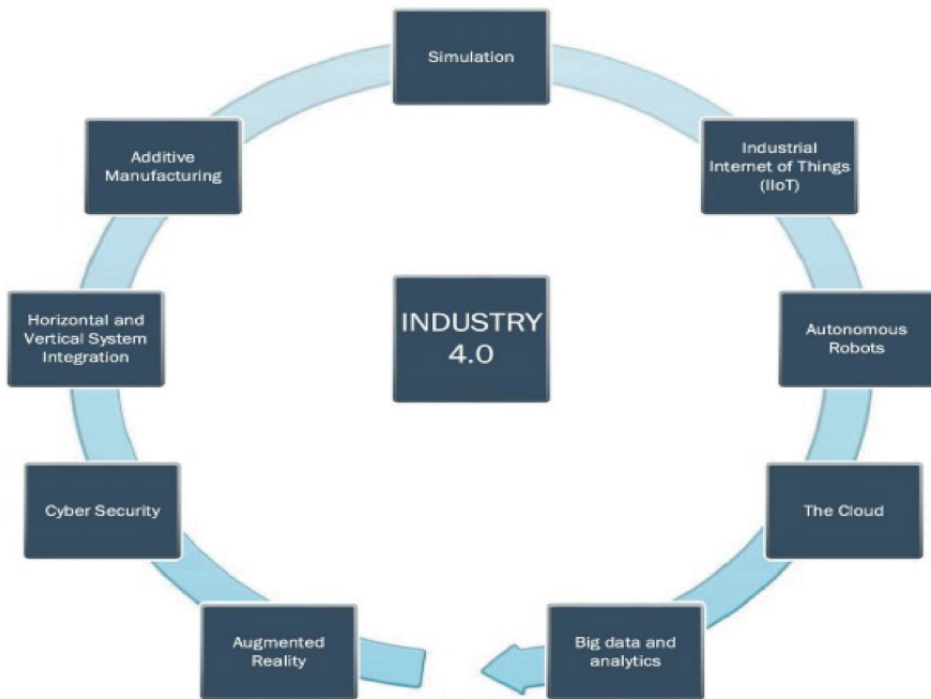
Integración horizontal a través de redes de valor. Integración de diversos sistemas informáticos utilizados en las diferentes etapas de la fabricación y procesos de planificación de negocios que involucren un intercambio de materiales, energía e información tanto dentro de una empresa (por ejemplo, logística de entrada, producción, logística de salida, marketing) y entre varias empresas diferentes (redes de valor).

Integración digital de extremo a extremo de la ingeniería en toda la cadena de valor. Sistemas de TI apropiados, que pueden proporcionar soporte de extremo a extremo a toda la cadena de valor, desde el desarrollo de productos hasta la ingeniería de sistemas de fabricación, producción y servicios. Se requiere un enfoque holístico de ingeniería de sistemas, que incluya diferentes disciplinas técnicas.

Integración vertical y sistemas de fabricación en red. Varios sistemas de TI en los diferentes niveles jerárquicos dentro de una empresa, (por ejemplo, actuador y sensor, control, gestión de producción, fabricación y niveles de planificación empresarial y de ejecución) están encadenados para ofrecer una solución de extremo a extremo.

En la Figura 82 se muestran las diferentes tecnologías que hace posible la industria 4.0. Todas son importantes, no obstante, se destacan el Internet de las cosas IoT (*Internet of Things*), la computación en la nube (*cloud*), el *big data*, y para el caso de mantenimiento es muy importante la realidad aumentada (*augmented reality*).

Figura 82. Tecnologías de la industria 4.0



El internet de las cosas es la digitalización del mundo físico, con el fin de originar una interconexión digital entre la red local de las cosas a una red global para así causar una sincronización de estas, compartiendo información continuamente, con el fin de brindar servicios más eficientes y completos para los usuarios, es decir, es la existencia de un ecosistema de tecnologías que hacen un seguimientos del estado de los diversos objetos asociados capturando datos significativos, y comunicando esta información a aplicaciones software a través de redes IP.

4.7.2 Fábrica inteligente

En una fábrica inteligente, personas, máquinas y los recursos se comunican entre sí tan naturalmente como en una red social. Una fábrica inteligente (Figura 84) posee la siguiente arquitectura genérica:

- Recursos físicos o artefactos Inteligentes
- Una red industrial, es decir, la infraestructura que permite la comunicación entre artefactos y conecta la capa de recursos físicos con la capa de nube (*cloud*)
- La nube (*cloud*), o red de servidores que proporciona servicios en capas en la forma de infraestructura
- Terminales de supervisión y control, para comunicar a las personas con la fábrica inteligente.

Los recursos tangibles, los cuales se encuentran comunicados a la red industrial y por este hecho son considerados como recursos inteligentes, y permiten que la información intangible fluya por medio de un mundo digital y pueda ser transmitida con facilidad y en tiempo real, facilitando que los artefactos físicos y las entidades informativas estén profundamente integrados.

Las fábricas inteligentes buscan garantizar:

- Personalización masiva
- Flexibilidad
- Visibilidad y toma de decisiones optimizada
- Nuevos métodos de planificación para las fábricas
- Creación de nuevos servicios
- Creación de valor del big data recolectado monitoreo remoto
- Automatización y ser función de cambio para el hombre

- Mantenimiento proactivo
- Cadenas de suministro conectadas
- Gestión de la energía.

Así, las fábricas inteligentes tienen varios conceptos interrelacionados, máquina inteligente, dispositivos inteligentes, fabricación inteligente, ingeniería inteligente, logística inteligente, tarea inteligente, Proveedor inteligente, datos inteligentes y redes inteligentes [48]

4.7.3 Mantenimiento basado en la condición MBC u *on-condition*

Se trata de una evolución del mantenimiento predictivo. El MBC, con métodos más sofisticados y a partir de predicciones basadas en la medición de diversos parámetros que muestren una relación predecible, indica cuando reemplazar o realizar acciones de mantenimiento sobre un componente, pieza o conjunto de una máquina o equipo, antes de que se presente alguna falla, minimizando tiempos muertos y maximizando sus vidas útiles (Figura 85).

El desarrollo de las tecnologías de la informática y las comunicaciones TIC's y posteriormente del IoT, permitieron el desarrollo del MBC, puesto que proveyeron el ancho de banda de red necesario para recopilar, recuperar y analizar datos y las capacidades de apoyo a la toma de decisiones para grandes conjuntos de datos de series de tiempo. En MBC el flujo de información proveniente de sensores u otros medios de máquinas y equipos que informan constantemente el estado de sus componentes, ocurre en tiempo real.

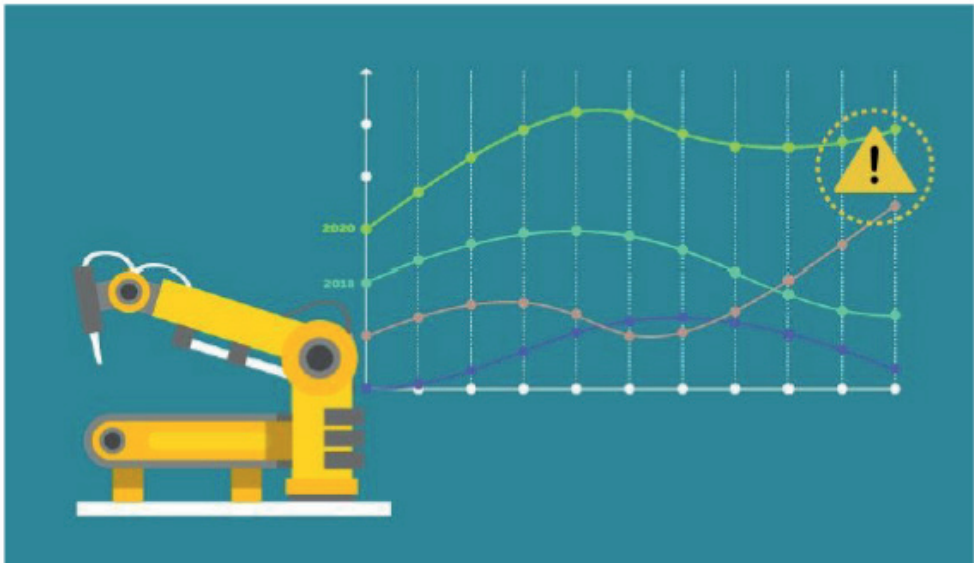
El mantenimiento basado en la condición sugiere implementar acciones de mantenimiento solo cuando existe evidencia de comportamientos anómalos, en uno o varios elementos físicos teniendo como base información que ha sido recopilada y almacenada por medio de un monitoreo constante y en tiempo real, de las condiciones del equipo/máquina, midiendo parámetros como niveles de lubricante, contaminantes, niveles de ruido, temperatura, vibración, entre otros, para así generar alarmas que notifiquen sobre alguna irregularidad. Esto correctamente establecido puede generar grandes beneficios en cuanto ahorro de recursos y tiempo, lo que a su vez se traduce en una reducción significativa de los costos de mantenimiento [50].

De manera muy resumida, los pasos principales del MBC son:

- La recopilación de información (datos y señales) relevantes para conocer el estado del sistema: datos de eventos y datos de monitoreo de condición (variables)
- Procesamiento y manejo de información (datos y señales) para su posterior análisis y una mejor comprensión e interpretación de estos
- Toma de decisiones de mantenimiento en base a lo extraído y analizado, para recomendar políticas de mantenimiento eficientes

Figura 85. Mantenimiento basado en la condición MBC

Tomado de [50]

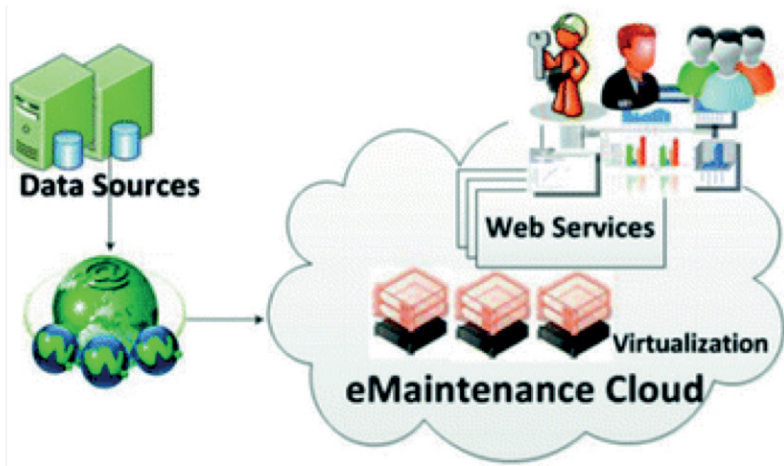


4.7.4 e-Maintenance

Se trata de un soporte de mantenimiento que incluye los recursos, servicios y administración necesarios para permitir la ejecución proactiva de procesos de decisión. *e-Maintenance* (Figura 86) hace uso de varias tecnologías electrónicas (como por ejemplo las TIC, realidad aumentada, identificación por radiofrecuencia RFID, etc.) basadas en la web e inalámbricas, así como actividades de mantenimiento electrónico (p. ej., monitoreo electrónico, diagnóstico electrónico y pronóstico electrónico), para apoyar la producción y los negocios”.

La realidad virtual o aumentada es un término que describe las aplicaciones en tiempo real, que mezclan información del mundo físico, con información de una aplicación. Para el caso de mantenimiento permite el guiado experto de manera remota de una persona, con instrucciones sencillas, para atender tareas que en principio son complejas.

Figura 86. e-Maintenance en la nube con servicios web



4.8 Un estudio de caso. Análisis de falla en rodamiento de motor eléctrico en ladrillera (Cartago - Valle del cauca), con prueba combinada de balanceo y análisis termográfico

Equipo: Motor de 150HP a 1775 RPM. Rodamiento lado polea 6318, rodamiento lado ventilador 6314.

Antecedentes

Según información suministrada por el personal de Planta, el motor había venido presentando vibración excesiva, por lo cual había sido intervenido varias veces, y en la última ocasión el alojamiento del rodamiento 6318 lado polea fue “metalizado” y mecanizado, debido a que presentaba holgura excesiva; según lo reportado por el personal, luego de la reparación, el rodamiento fue introducido a “golpe suave” de martillo. Luego de esta reparación la vibración disminuyó drásticamente, sin embargo, se comenzó a presentar un problema de recalentamiento en la zona adyacente a dicho del rodamiento, lo que ha generado que las correas se dañen de manera acelerada (cuestión de días).

Mediciones y observaciones.

Se determinó hacer medición de vibraciones y simultáneamente un ensayo termográfico. Se hizo uso de cámara termográfica *Wuhan guide* TP8S y equipo analizador de vibraciones DSP *Logger* MX 300. Al momento de hacer las mediciones y observaciones, el motor estaba montado sobre una estiba, sin asegurar al piso. El sistema fue energizado y a pesar de no estar anclado al piso, no se movió de donde estaba inicialmente ubicado y no se percibió vibración en el piso (al tacto). Las mediciones (Tabla 22) se realizaron por un lapso aproximado de una hora, sin carga. Adicionalmente, se observó que la polea presenta ligero “bote”, y se percibió un sonido agudo (“grillo suave”).

Análisis de información.

Con base en las lecturas, los antecedentes y las observaciones el diagnóstico fue el siguiente:

- No hay problemas de balanceo.
- Hay temperatura anormal en el rodamiento lado polea.
- El pico del espectro a 9X, induce a pensar que hay problemas de tolerancias en los ajustes del rodamiento del lado de la polea, es decir, holgura excesiva entre pista exterior y alojamiento, lo que genera el recalentamiento. Este análisis no exime de pensar que haya problema de excesiva tensión en la transmisión por correas, lo cual no pudo ser constatado por encontrarse el motor desmontado y trabajando en vacío.

Tabla 22. Pruebas realizadas al motor. Tomado de [3]

Ítem	Actividad	Resultado
1	Medición de fase	El espectro no arrojó indicio de desbalanceo
2	Captura del espectro de vibraciones, en velocidad	Velocidades de onda de múltiples componentes, a 9X y valores superiores (Figura 88)
3	Medición termográfica de las temperaturas de ambos cojinetes del motor.	El cojinete del lado del ventilador presentó temperatura del orden de 34 ° C, mientras que el del lado de la polea temperaturas del orden de 54°C***. Figura 89

Figura 87. Espectro de onda en velocidad. Tomado de [3]

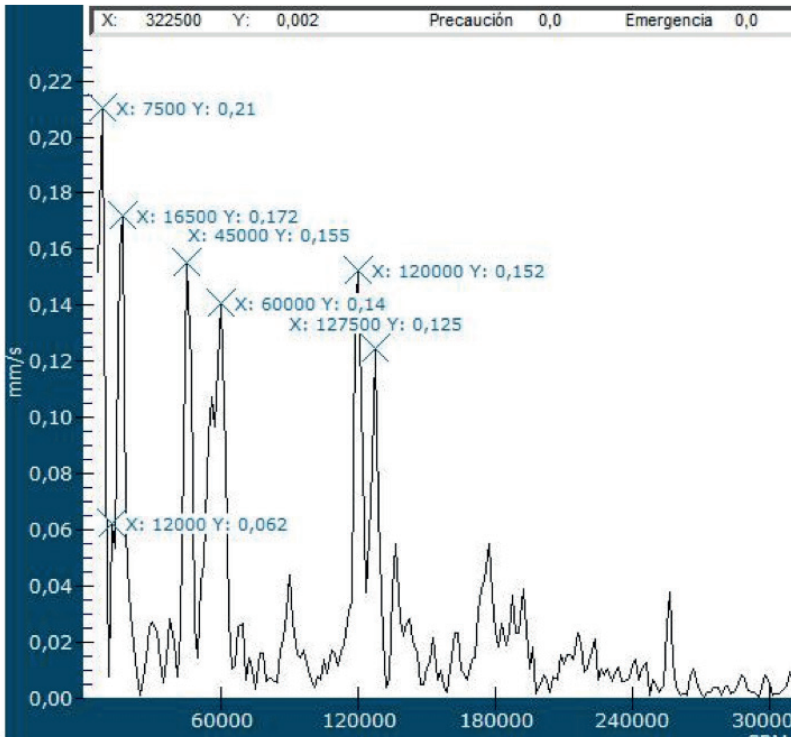
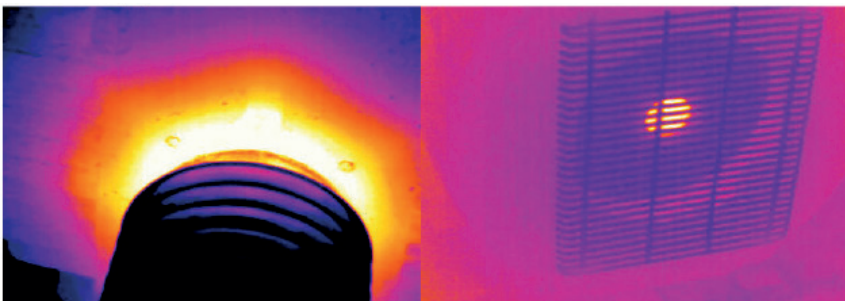


Figura 88. Termografía rodamientos lado polea y lado ventilador. Tomado de [3]



Acciones para seguir:

Según consulta en catálogo FAG, el rodamiento 6318 (el de la temperatura anormal), posee unas dimensiones de 90 mm x190 mm x 43 mm y un peso de 5,72 kg.

Según consulta en el *software* APEM (aplicativo de software desarrollado por estudiantes de Tecnología Mecánica de la UTP), la tolerancia para el agujero (alojamiento de la pista exterior) es N7 () y la tolerancia para el eje es k5 (), Figuras 90 y 91. El personal de la empresa había mencionado que el rodamiento lado polea fue montado con “golpe suave de martillo”, y según lo arrojado por el software, el ajuste es por *apriete* o *interferencia*, es decir que de ninguna manera el montaje podría haberse hecho a “golpe suave de martillo”.

Se sugirió desarmar el motor y realizar metrología dimensional al eje y al alojamiento, los cuales deberían estar dentro de los márgenes escritos líneas arriba, y en caso contrario corregir. El procedimiento se efectuó, se encontraron valores fuera de orden, se mecanizó el sistema para alcanzar las tolerancias adecuadas y el problema fue solucionado.

En este estudio de caso se muestra como a veces una técnica de Predictivo en particular, no basta para dar solución a un problema, por lo cual es necesario hacer ensayos combinados, sumados a sus respectivos análisis.

Figura 89. Aplicación de software APEM para determinar ajuste del agujero

Tomado de [3]

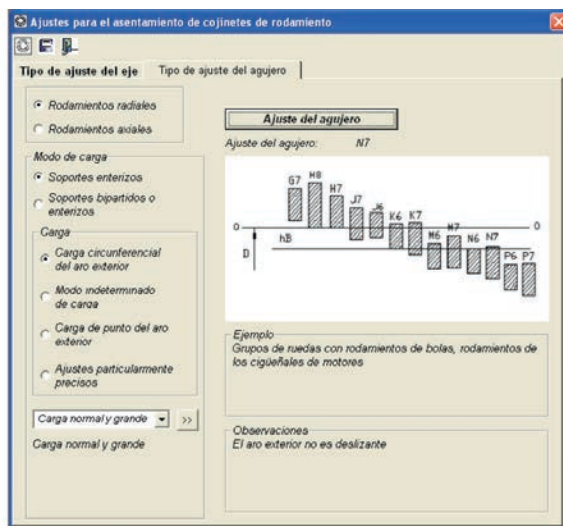


Figura 90. Aplicación de software APEM para determinar ajuste del eje
Tomado de [3]

Ajustes para el asentamiento de cojinetes de rodamiento

Tipo de ajuste del eje | **Tipo de ajuste del agujero**

Rodamientos radiales
 Rodamientos axiales

Diametro del gorrón [mm]
 90 (0 - 280)

Modo de carga
 Carga de punto del anillo interior
 Carga circunferencial del anillo interior
 Carga
 Carga grande

Tipo de rodamiento
 Rodamientos de bolas
 Rodamientos de una hilera de rodillos cónicos
 Rodamientos de rodillo a rótula

Ajuste del eje

Ajuste del eje: k5

Ejemplo
 Asentamientos generales, motores eléctricos, turbinas, bombas, motores de combustión, cajas de velocidades y máquinas para labrar madera

Observaciones
 Para rodamientos de rodillos cónicos se pueden emplear generalmente tolerancias k6 o m6 en vez de k5 o m5, puesto que no ejercen influencia alguna en cuanto a la disminución del juego radial

CAPÍTULO CINCO

Mantenimiento Productivo Total TPM

5.1. Introducción

El Mantenimiento Productivo Total (*Total Productive Maintenance* por sus siglas en inglés) es el sistema de mantenimiento en el cual hay compromiso y colaboración en todos los niveles de la Compañía, incluyendo la gerencia, con el fin de maximizar la productividad. Se entiende por *productividad* la maximización de la relación entre los productos o servicios obtenidos, a partir de unos recursos. En términos simples ser productivo es producir lo máximo con lo mínimo, respetando la calidad.

De manera similar al Mantenimiento Predictivo, el TPM surgió como una evolución del Mantenimiento Preventivo. El término TPM se puede desagregar y analizar la contribución de cada uno de sus componentes, para alcanzar el incremento de la productividad.

Mantenimiento: Conservación de las instalaciones en buen estado con acciones como reparar, limpiar, apretar, lubricar y dedicar tiempo a estas tareas básicas

Productivo: Destinado a la producción, con enfoque de no penalizarla. Noción de rendimiento-eficacia de las acciones de mantenimiento y mejora continuada.

Total: participación de toda la fuerza de trabajo de la empresa y considerando todos los aspectos relacionados a las máquinas/equipos

A diferencia de los sistemas de mantenimiento preliminares (correctivo, programado, preventivo, predictivo), el TPM no se centra en las máquinas/equipos; inicialmente se enfoca en las personas para sensibilizarlas, capacitarlas, cambiarles para bien su actitud en el trabajo, su visión de la vida; posteriormente estas personas centrarán su atención en la producción (instalaciones, procesos, máquinas y equipos), con miras a incrementar la productividad, y por ende a ser más competitivos como personas y como organización. En fases avanzadas el TPM debe ser una filosofía de vida, y no de trabajo (tal como ocurre en Japón).

El TPM maneja un concepto en materia de mantenimiento, basado en los siguientes cinco principios fundamentales:

- Participación de todo el personal, desde la alta dirección hasta los operarios de planta. Incluir a todos y cada uno de ellos permite garantizar el éxito del objetivo

- Creación de una cultura corporativa orientada a la obtención de la máxima eficacia en el sistema de producción y gestión de los equipos y maquinarias. De tal forma se trata de llegar a la eficacia global
- Implantación de un sistema de gestión de las plantas productivas de manera tal que se facilite la eliminación de las pérdidas antes de que se produzcan y se consigan los objetivos propuestos.
- Implantación del mantenimiento preventivo como medio básico para alcanzar el objetivo de cero pérdidas mediante actividades integradas en pequeños grupos de trabajo y apoyado en el soporte que proporciona el **Mantenimiento Autónomo**.
- Aplicación de los sistemas de gestión a todos los aspectos, diseño, producción, desarrollo, ventas, postventa y dirección.

5.2. Siglas y términos a tener en cuenta en TPM

JIT: *Just In Time* (Justo a Tiempo). Estrategia técnico-administrativa que propende a mantener el mínimo de inventarios (tanto de materia prima como de producto intermedio y producto terminado), ya que ello representa dinero retenido, lucro cesante.

Kaizen: Palabra Japonesa que engloba toda una Filosofía empresarial y de vida, la cual se puede resumir en **“No debe pasar un día sin que se haya hecho alguna clase de mejoramiento en algún lugar de la compañía”**. Un término equivalente es: *Mejoramiento continuo*. El *Kaizen* también se puede tomar como mejoramiento continuo hasta alcanzar la calidad total.

TQM: *Total Quality Management*. Control Total de la Calidad. Calidad es hacer las cosas bien y a la primera.

5.3. Origen y evolución del TPM

El TPM surgió en Japón, en la década de 1960, gracias a los esfuerzos y directrices del *Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM)* como una estrategia de Mantenimiento industrial, basada en el mejoramiento del sistema de mantenimiento preventivo, destinada a lograr la eliminación de las *seis grandes pérdidas* de las máquinas/equipos, para poder hacer factible la producción *Just in Time*, la cual tiene como objetivo la eliminación sistemática de desperdicios.

Las *seis grandes pérdidas* se hallan directa o indirectamente relacionadas con las

máquinas/equipos de las industrias, dando lugar a reducciones en la eficiencia del sistema productivo, en tres aspectos fundamentales:

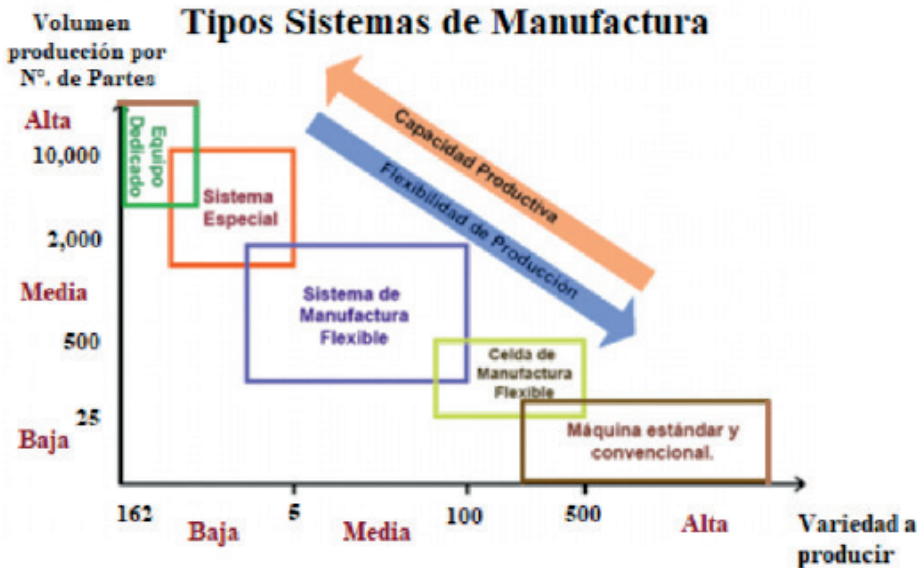
- Averías y tiempos de preparación que ocasionan tiempos muertos o de vacío
- Funcionamiento a velocidad reducida y los tiempos en vacío, todo lo cual genera pérdidas de velocidad del proceso
- Pérdidas de productos y procesos defectuosos ocasionados por los defectos de calidad y repetición del trabajo.

Mejorar los tres aspectos mencionados anteriormente tiene relación directa con mejorar los indicadores *Disponibilidad*, *Porcentaje de producto conforme*, *Confiabilidad* y *Mantenibilidad*, los cuales serán desarrollados en el *Capítulo 12*. El TPM adopta como filosofía el principio de *Kaizen* o *mejoramiento continuo*, aplicados al mantenimiento y a la gestión de equipos.

Previo a la aparición del TPM propiamente dicho, en la década de 1960 tuvo lugar la aparición del *Mantenimiento Productivo*. El Mantenimiento Productivo incluye los principios del Mantenimiento Preventivo, pero le agrega un plan de mantenimiento para toda la vida útil del equipo, más labores e índices destinados a mejorar la confiabilidad y mantenibilidad (ver *Capítulo 12*). La aplicación del TPM comenzó a incrementarse en Japón durante la década de 1970. El TPM involucra a todos los empleados, desde los cargos altos hasta los operarios de planta. También agrega a conceptos antes desarrollados como el Mantenimiento preventivo, y nuevas herramientas tales como las Mejoras de Mantenibilidad, la Prevención de Mantenimiento y la detección analítica de fallas.

Para dar una idea del transcurrir de las empresas, antes y después del TPM, a continuación, se hará una síntesis. La empresa tradicional suele estar dotada de sistemas de gestión basados en la producción de series largas, con poca variedad de productos, tiempos de preparación o alistamiento largos, tiempos de entrega de producto terminado largos, operarios con una formación muy especificada, control de calidad basado en la inspección de producto (recordar el *flow shop Anexo 1*). Cuando dicha empresa ha precisado emigrar desde este sistema a otros más ágiles y menos costosos, ha necesitado mejorar los tiempos de entrega, los costes y la calidad simultáneamente, es decir, incrementar su *competitividad*, lo que le ha supuesto entrar en la dinámica de gestión contraria a la mencionada previamente, es decir: series cortas de múltiples productos, tiempos de operaciones cortos, con trabajadores polivalentes y calidad basada en procesos que llegan a sus resultados “en la primera”, tal como debe ocurrir en *Manufactura flexible* (Ver Figura 92).

Figura 91. Relación variedad de partes versus volumen de producción, en función del sistema de manufactura Tomado de [52]



La competitividad se basa en estrategias tales como: mejorar el mantenimiento de los equipos, cambio rápido de herramientas, reducción de tiempos de preparación, mejora del *layout* de la planta y oficinas, mejorar los niveles de calidad, control y reducción del consumo de energía, mayor participación de los empleados vía círculos de calidad, círculos de incremento de la productividad y sistemas de sugerencias. Una de las consecuencias de mejorar el mantenimiento es la reducción de inventarios de producto en proceso y producto terminado, que sirva de colchón ante las averías probables.

El resultado final que se persigue con la implementación del TPM es lograr un conjunto de equipos e instalaciones productivas más eficaces, una reducción de las inversiones necesarias en ellos y un aumento en la flexibilidad del sistema productivo. Dado que estamos en un mundo globalizado y Competitivo, TPM es uno de los sistemas fundamentales para lograr la *eficiencia total*, la cual es la base para alcanzar la *competitividad total*. Debido a la tendencia actual a mejorar la competitividad es necesario ser eficiente en calidad, tiempo y coste de la producción, por lo que conjuntamente se deben aplicar el TPM y el TQM.

La aplicación del TPM garantiza a las empresas resultados en cuanto a la mejora

de la productividad de los equipos, mejoras corporativas, mayor capacitación del personal y transformación del puesto de trabajo.

Entre los objetivos principales del TPM se tienen:

- Reducción de averías en los equipos
- Reducción del tiempo de espera y de preparación de los equipos
- Utilización eficaz de los equipos existentes
- Control de la precisión de las herramientas y equipos
- Promoción y conservación de los recursos naturales y economía de energéticos
- Formación y entrenamiento del personal

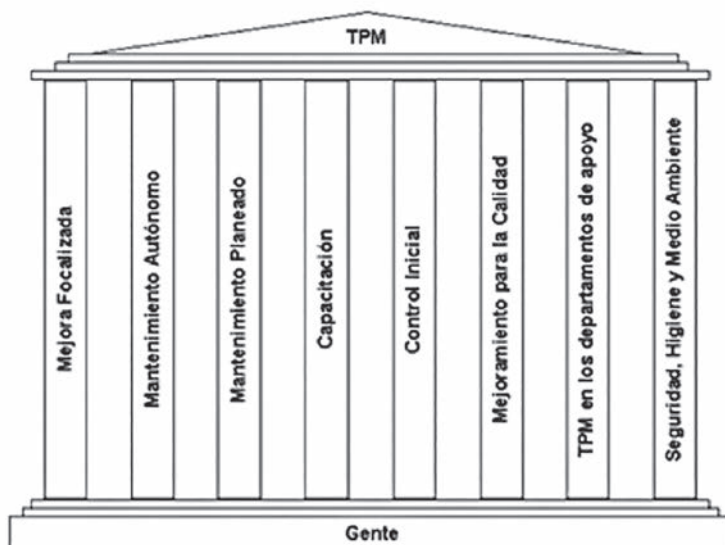
El TPM en términos prácticos pretende lograr en una planta: Cero averías, Cero Setup o tiempo de alistamiento, Cero defectos, Cero despilfarros, Cero accidentes y Cero contaminaciones.

Estas pérdidas, como filosofía, deben ser eliminadas o llevadas a cero.

5.4. Los ocho pilares fundamentales del TPM

Para alcanzar una aplicación exitosa y continuada del TPM, se debe seguir la aplicación sistemática de los ocho pasos generales mostrados en la Figura 93.

Pilar 1: Mejora Focalizada. Tiene como objetivo eliminar las *grandes pérdidas del proceso productivo*, gracias a la aplicación de metodologías que permitan llegar a la causa-raíz del problema, cuantificarlo, poner metas y alcanzarlas, así como conservar y transferir el conocimiento adquirido en este proceso.

Figura 92. Los ocho pilares del TPM Tomado de [53]

Pilar 2: Mantenimiento autónomo. Se busca hacer partícipe al operario de la conservación, mantenimiento y/o mejora de la máquina donde trabaja, de manera que pueda detectar a tiempo las fallas potenciales. El mantenimiento autónomo puede entre otros aspectos, prevenir la contaminación por agentes internos y externos, las roturas de ciertas piezas, los desplazamientos y los errores en la manipulación con sólo instruir al operario en limpiar, lubricar, revisar y reportar (ver numeral 5.6).

Pilar 3: Mantenimiento planeado. Pretende mantener las máquinas/equipos/ procesos en un estado “óptimo”, aplicando actividades sistemáticas y metódicas para construir y mejorar continuamente”. Se procura que el operario diagnostique la falla mayor (de las menores se encarga él mismo de resolverlas) y la indique convenientemente para facilitar la detección de la avería al personal de mantenimiento encargado de repararla.

Pilar 4: Capacitación. Puesto que el operario toma un papel protagónico en el proceso productivo, y adicionalmente debe realizar funciones que en el sistema tradicional no efectuaba, entonces debe ser convenientemente capacitado. La capacitación debe hacerse extensiva en lo posible a todo el personal de la propia empresa. Este pilar pretende adicionalmente: formar personal competente en máquinas/equipos y en la mejora continua de su área de responsabilidad, estimular el autodesarrollo del personal, desarrollar recursos humanos que puedan satisfacer

las necesidades de trabajo futuras, estimular la formación sistemática del personal.

Pilar 5: Control inicial. **Se busca reducir** el deterioro de las máquinas/equipos y mejorar los costos de su mantenimiento en el momento que se compran y se incorporan al proceso productivo. El aprendizaje adquirido en unas máquinas/equipos debe ser aplicado en la puesta a punto y operación de los nuevos, para que sean fiables, fáciles de mantener, fáciles de operar y seguros.

Pilar 6: Mejoramiento para la calidad. Pretende alcanzar la meta de calidad de cero defectos en la producción, para lo cual la máquina/equipo debe presentar también cero defectos. Se deben tomar acciones preventivas para alcanzar un proceso y equipo cero defectos.

Pilar 7: TPM en los departamentos de apoyo. Puesto que la meta última del TPM es maximizar la productividad, entonces se deben eliminar las pérdidas en los procesos administrativos de apoyo, aumentando su eficiencia. Este pilar pretende generar comunicación y un equilibrio entre las actividades primarias de la cadena de valor y las actividades de soporte.

Pilar 8: Seguridad, Higiene y medio ambiente. Se deben aplicar políticas y medidas para garantizar un ambiente laboral sin accidentes y sin contaminación. La contaminación en el ambiente de trabajo puede llegar a producir un mal funcionamiento de una máquina o viceversa. Muchos de los accidentes de trabajo son ocasionados por la mala distribución de las máquinas/equipos y herramientas en el área de trabajo, o por el mal estado de las instalaciones, utillajes o herramientas.

5.5. Las cinco eses o 5S

Las 5S es una metodología de mejoramiento continuo que pretende reducir los costos por pérdidas de tiempo y energía, mejorar la calidad de la producción, reducir los riesgos de accidentes o sanitarios, incrementar la seguridad industrial y mejorar las condiciones de trabajo al igual que elevar la moral del personal. La metodología 5S consta de cinco fases, cada una de las cuales comienza por S (en japonés).

Seiri: Seleccionar. Eliminación de todo lo innecesario (Figura 94). “Lo que no sirve estorba”.

Figura 93. Proceso de clasificación de aceites, grasas, filtros y herramientas
Tomado de [54]



Seiton: Organizar. Un lugar para cada cosa y cada cosa en su lugar. Es un principio de funcionalidad. Todo objeto que se utiliza en una labor debe volver a su sitio original. La Figura 95 muestra un ejemplo concreto del antes y después al aplicar Seiton.

Figura 94. El antes y el después al aplicar Seiton a un taller de lubricación
Tomado de [54]



La Figura 96 presenta ejemplos simples de organización de repuestos e insumos. La implementación de esta medida no es costosa, y elimina el típico “*tarro de los tornillos*” del mecánico tradicional, en el que regularmente no encuentra lo que necesita, y a cambio pierde tiempo valioso.

Figura 95. Ejemplo de aplicación de Seiton para organizar repuestos
Tomado de [8]



Seiso: Limpiar. Retirar la suciedad acumulada de mi sitio de trabajo, incluyendo las máquinas. Esta limpieza deber hacerse tanto durante el tiempo de producción como al finalizar la jornada. La Figura 97 muestra un ejemplo concreto del antes y después al aplicar SEISO. Axioma de las 5S, “*Un lugar limpio no es el que más se limpia, sino el menos se ensucia*”

Figura 96. El antes y el después al aplicar Seiso a un taller de lubricación
Tomado de [54]



Seiketsu: Estandarizar. Una vez definidos y alcanzados los niveles de organización y limpieza, estos deben ser mantenidos en el tiempo, es decir, no ejecutar estas tareas sólo cuando haya visitas ilustres o cuando a los jefes se les ocurre darse una pasadita por la fábrica o las oficinas. Una forma de garantizar el *SEIKETSU* es programando y ejecutando brigadas de limpieza y orden, con su debido cronograma.

Shitsuke: Sostener. Capacitar y concientizar a la gente para que de manera autónoma realice estas tareas cotidianamente. La Figura 98 ilustra una conservación en el tiempo del orden, el aseo y la organización en un taller de lubricación al cual se le aplicaron las 5S.

Figura 97. Aplicación de Shitsuke en un taller de lubricación Tomado de [54]



5.6. Mantenimiento autónomo

Estrategia básica de mantenimiento que se caracteriza por la participación activa por parte de los operarios, en el proceso de prevención con el objetivo de evitar averías y deterioro de sus máquinas y equipos. Para alcanzar el mantenimiento autónomo tiene especial trascendencia la aplicación práctica de las 5S. Una característica básica del Mantenimiento Autónomo (o de primer nivel), es que son los operarios de producción quienes lo llevan a cabo. Algunas de las tareas fundamentales son: limpieza, inspección, lubricación, aprietes y ajustes

5.6.1. Objetivos del Mantenimiento Autónomo

El mantenimiento Autónomo busca alcanzar los seis objetivos descritos a continuación.

- Emplear la máquina/equipo como instrumento para el aprendizaje y adquisición de conocimiento.
- Desarrollar nuevas habilidades para el análisis de problemas y creación de un nuevo pensamiento sobre el trabajo, mediante una operación correcta y permanente que evite el deterioro.

- Mejorar el funcionamiento de la máquina/equipo con el aporte creativo del operador.
- Construir y mantener la máquina/equipo en condiciones óptimas.
- Mejorar la seguridad en el trabajo.
- Mejorar la moral en el ambiente de trabajo.

5.6.2. Pasos para la implementación del Mantenimiento autónomo

Los pasos descritos a continuación permiten alcanzar una división adecuada y sana entre los departamentos de producción y mantenimiento, delimitando deberes y responsabilidades, y eliminando el típico pensamiento tradicional de “Yo opero, Tú reparas” y transformarlo en “*Yo soy responsable de mi máquina/equipo*”.

Limpieza inicial. En este paso inicial confluyen tanto el mantenimiento autónomo como las 5S. La Figura 99 presenta un ejemplo de limpieza inicial y conservación de esta. En esta aplicación particular y muy exitosa de TPM (ver referencia [8]), aplican el principio sencillo de “pintura clara para las máquinas/objetos que se ensucian”, para que sea fácilmente detectable la condición de suciedad”. Los procesos de limpieza permiten al operador de la máquina descubrir deficiencias y posibles causas actuales y potenciales.

Eliminación de fuentes de contaminación y áreas inaccesibles. Aparte de la mala impresión que ofrece un área inaccesible y contaminada, puede ser causante de accidentes laborales o industriales, y encubrir fallas potenciales. La Figura 100 ejemplifica la no aplicación de este paso.

Definir estándares para condiciones básicas e inspección general. Este paso tiene como fin diseñar y elaborar Estándares que ayuden a mejorar los métodos de los técnicos en las intervenciones de mantenimiento, haciendo más efectivo y seguro el trabajo que realizan. El producto de la aplicación de este paso es la elaboración de *Estándares de mantenimiento*, *Estándares de ajustes críticos* y levantamiento de información de piezas de desgaste para las diferentes líneas de producción. La Figura 101 presenta un ejemplo de Estándares de ajustes en equipos críticos.

Figura 98. Aplicación inicial y continuidad de limpieza Tomado de [8]

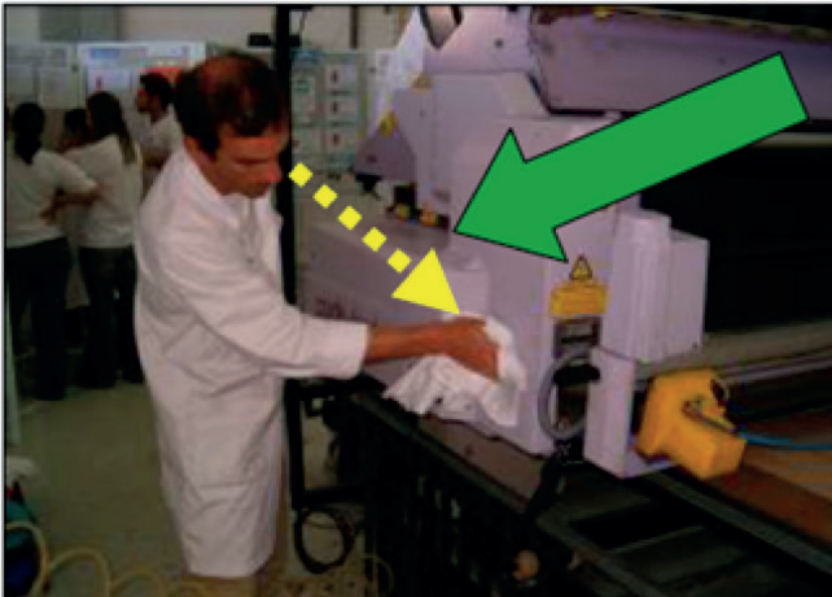


Figura 99. Contra-ejemplo de no eliminación de fuentes de contaminación y conservación de áreas accesibles Tomado de [8]

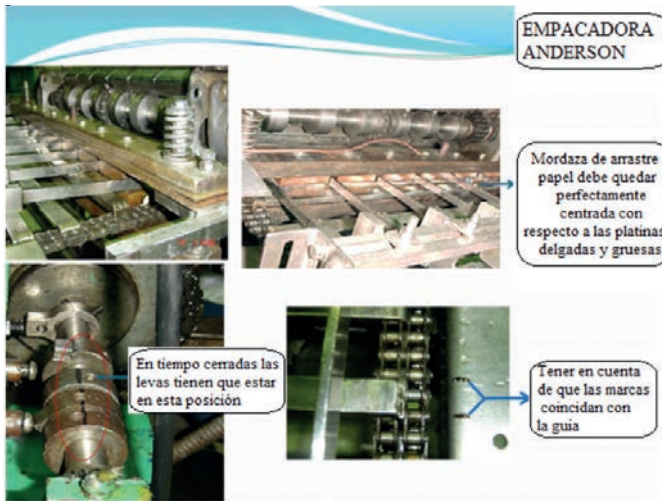


Inspección autónoma, desarrollando listas de verificación del Mantenimiento autónomo.

Las inspecciones autónomas se pueden ayudar con pequeñas medidas visuales y de bajo costo, como marcas, instrumentación con colores por rangos de operación.

La Figura 102 presenta algunos ejemplos prácticos de estas medidas.

Figura 100. Ejemplo un estándar de mantenimiento en una industria alimenticia Tomado de [55]



Objetivo: Garantizar el correcto funcionamiento de las mordazas de la galletera para que se realice un correcto sellado del papel y no se produzcan defectos de calidad o un paro mecánico.

Figura 101. Ejemplos de inspección autónoma Tomado de [8]



Organización y mantenimiento del lugar de trabajo, estandarizando los elementos de este. Una medida sencilla posterior a la definición de los elementos estandarizados que debe poseer un puesto de trabajo es utilizar “cuadros de sombra” (como los mostrados en la Figura 103) para llevar su control.

Figura 102. Ejemplos de uso de cuadros de sombra para la organización del lugar de trabajo Tomado de [8]

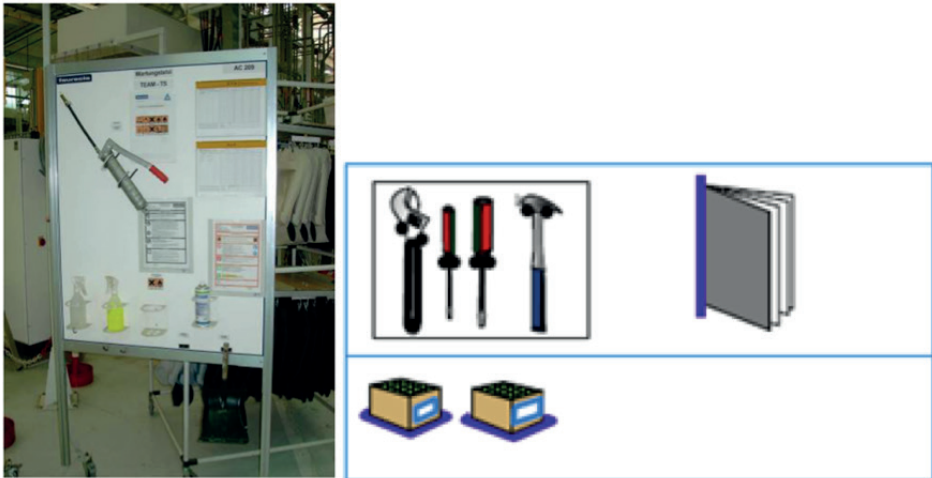
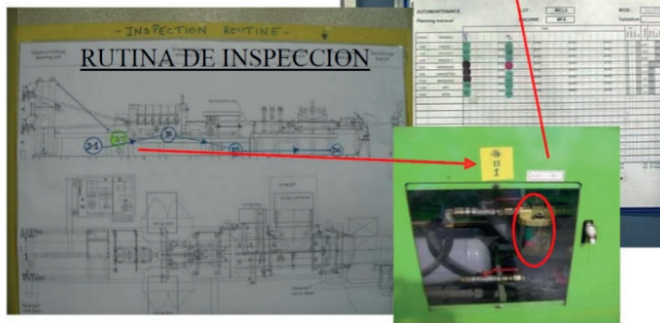


Figura 103. Ejemplo de implementación del mantenimiento autónomo Tomado de [8]

AUTO-MANTENIMIENTO NIVEL 2 :

- Comunicar :
 - Planificación tarea a realizar
 - Anomalías
 - Reaccion Estandard



Implementación del programa de mantenimiento autónomo, desarrollando metas para la compañía. En esencia se diseñan y aplican rutinas de inspección y se definen metas (indicadores), para validar el cumplimiento de los objetivos. Las Figuras 104 y 105 ilustran ejemplos de rutas de inspección en Mantenimiento autónomo, mientras que la Figura 106 ilustra una comunicación visual (a todo el personal) de cumplimiento de metas de la empresa, en el caso específico de Tiempo promedio entre fallas TBF (ver Capítulo 12).

Figura 104. Ejemplo de implementación del mantenimiento autónomo.
Tomado de [8]

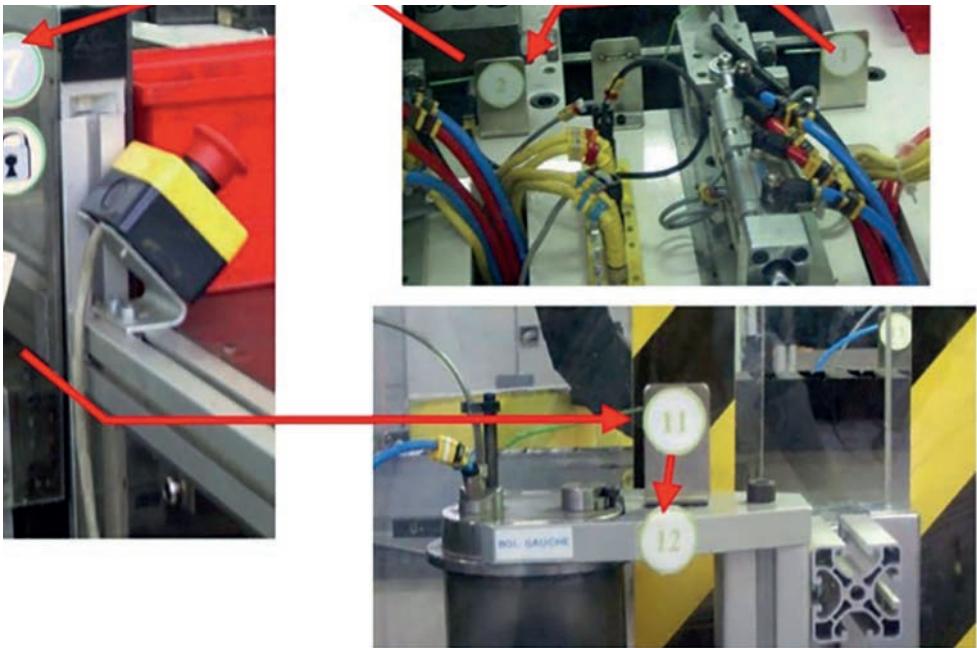
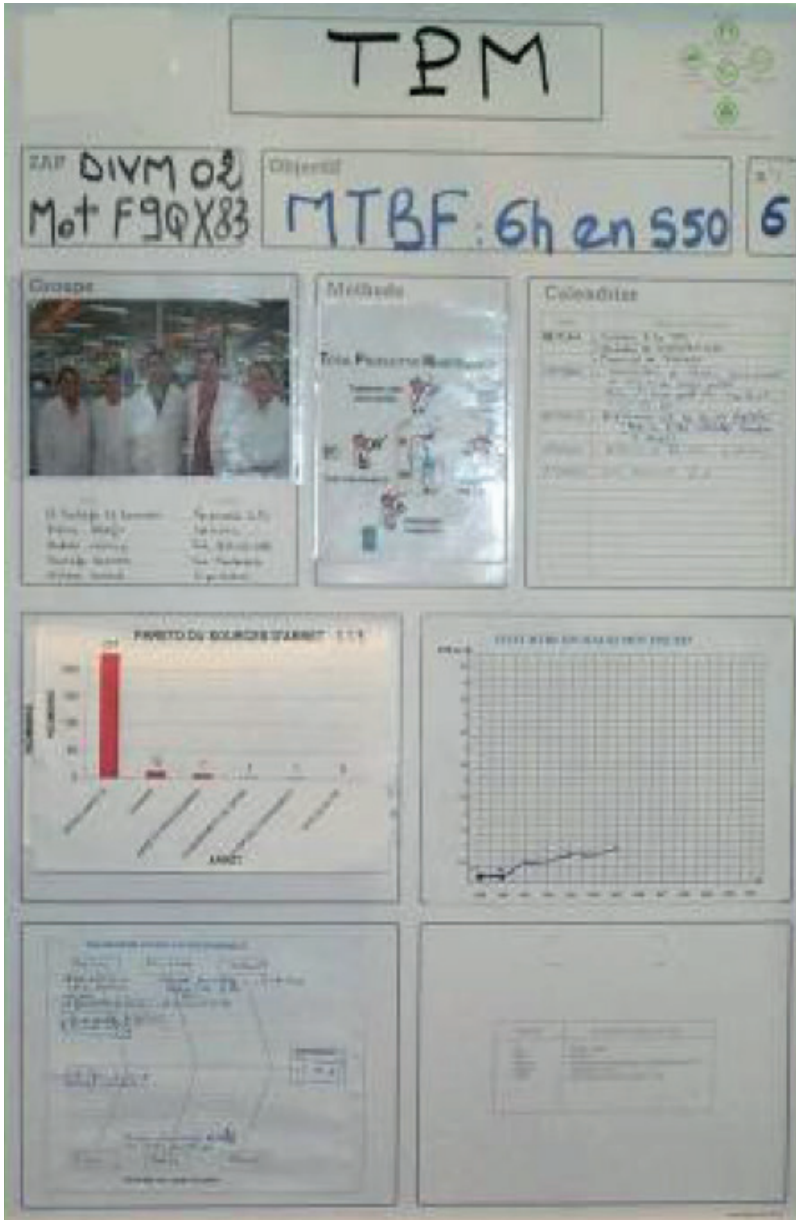


Figura 105. Ejemplo de comunicación visual de indicadores y metas en Mantenimiento autónomo. Tomado de [8]



5.7. Fases y etapas en la implementación del TPM

Las ventajas de aplicar TPM son evidentes y están basadas en medidas *simples* que regularmente no implican grandes inversiones por parte de la empresa, no obstante, el éxito en su implementación dista mucho de ser rápido y fácil, como pueden pensar muchos gerentes de visión cortoplacista. En la implementación de un programa de TPM se deben enfrentar varios retos como el de alcanzar compromiso por parte de toda la organización, *vencer la resistencia al cambio* y lograr el cambio de mentalidad de las personas, lo cual facilitará su adaptación a los cambios que traerán mejoras en la producción, el mantenimiento, los equipos, la calidad, la satisfacción del cliente y los empleados, la seguridad, el medio ambiente, etc. Para alcanzar el TPM se deben romper paradigmas, barreras ideológicas y culturales, además empezar a ver a mantenimiento como una gran inversión y no como un gasto.

La Tabla 23 presenta las fases y etapas generales requeridas para implementar exitosamente y de manera duradera el TPM en una empresa. Un proceso de implementación de TPM es largo y puede durar de 2 a 3 años, en un esfuerzo continuado de la organización.

Tabla 23. Fases y etapas para la implementación del TPM en una organización

Preparación	Decision de aplicar TPM en la empresa
	Campaña de información y sensibilización
	Formación de comités
	Análisis de las condiciones existentes (diagnóstico)
	Planificación
Implantación	Capacitación
	Implantación de las 3Y: Motivación, competencia y entorno de trabajo.
	Determinación y cálculo de relaciones e indicadores
	Experiencia piloto
	Implementación de las 5S
	Aplicación del <i>Mantenimiento Autónomo</i>
Evaluación	Aplicación del mantenimiento planificado
	Análisis de resultados obtenidos
Estandarización	Se estandarizan los resultados obtenidos y se da comienzo a un nuevo proceso continuo de mejoras en materia de confiabilidad y durabilidad.

5.8 Observaciones respecto del TPM

- Entre Japón y Colombia hay unas diferencias abismales en los aspectos culturales y de idiosincrasia. Lo que para un japonés es natural y normal en términos de orden, aseo y respeto, para muchos colombianos no lo será. Lo anterior se convierte en un escollo de primera mano para la implementación del TPM en empresas colombianas.
- El adagio popular reza “Del dicho al hecho hay mucho trecho”. Esto se cumple en el TPM, en donde en el papel todo suena “muy bonito”, pero la materialización de la implementación es dispendiosa y presenta muchas dificultades.
- Un camino para alcanzar el TPM, sería primero implementar las 5S, luego Mantenimiento Autónomo y por último (al cabo probablemente de muchos meses) afrontar la implementación formal del TPM (ver *numeral* 5.6). El haber implementado las 5S elevará las probabilidades de éxito del Mantenimiento Autónomo, y con esto las posibilidades de éxito al implementar posteriormente TPM
- A pesar de que el Mantenimiento Autónomo y las 5S forman parte del TPM, no es indispensable haber tomado la decisión de implementar TPM para poder aplicarlos. Ciertas empresas aplican las 5S como un medio de mejoramiento continuo, y Mantenimiento Autónomo como un complemento al Mantenimiento Preventivo, mejorando los resultados de sus procesos, entre ellos el clima laboral.
- Sería una locura pretender implementar TPM en una empresa cuya estrategia de Mantenimiento principal sea el Correctivo. Usualmente se espera que el Mantenimiento Preventivo esté en un buen nivel para pasar al TPM (por organización, hábitos, infraestructura, capacitación, etc.).

CAPÍTULO SEIS

Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM

6.1. Introducción

“El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM (*Reliability Centered Maintenance* por sus siglas en inglés) es una filosofía de gestión de mantenimiento, que optimiza la confiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, en función de cuán críticos son los activos, tomando en cuenta los posibles efectos que originarán los modos de falla de dichos activos, sobre la seguridad, al ambiente, o a las operaciones” [7].

“El objetivo del RCM es determinar el estado crítico de los equipos de cualquier proceso y, basados en esta información implementar un Mantenimiento Preventivo/Predictivo para las organizaciones” [56].

En este sistema de mantenimiento se pone especial énfasis en el funcionamiento global del sistema, más que en el de cada máquina/equipo individualmente; una máquina/equipo no es *intrínsecamente* importante, sino por la función que desempeñe dentro de un proceso productivo. En RCM la palabra clave es la *Confiabilidad* o Fiabilidad (*Reliability*).

El TPM tiene como objetivo final incrementar la **Productividad** de una organización, mientras que el RCM se centra en garantizar la **Confiabilidad** de un proceso/equipo. Empresas de clase Mundial han logrado mezclar exitosamente las dos estrategias, llevando las crisis y fallas a un nivel cercano a cero, con los correspondientes beneficios (incremento de la capacidad de producción, desarrollo del trabajo en equipo, racionalización de costos, mejora constante de los procesos).

6.2. Siglas y términos a tener en cuenta en RCM

Confiabilidad: Probabilidad que una máquina/quipo no falle durante su operación. Se evalúa por intermedio del tiempo promedio entre fallas *TPEF* (fórmula 14).

$$TPEF = \frac{T_{op}}{N_{arr}} \quad (14)$$

Donde

- TPEF* es la confiabilidad o tiempo promedio entre fallas;
- T_{op}* es el tiempo real de operación de la planta;
- N_{arr}* es el número de arranques de planta.

Mantenibilidad: Probabilidad que una máquina/equipo pueda ser puesto en condiciones operacionales en un período de tiempo dado, cuando el mantenimiento es ejecutado de acuerdo con procedimientos preestablecidos. Se puede evaluar por intermedio del Tiempo Promedio para reparar TPPR (fórmula 15).

$$TPPR = \frac{T_n}{N_a} \quad (15)$$

Donde

$TPPR$ es la mantenibilidad o tiempo promedio para reparar;

T_{nop} es el tiempo de no operación de la planta;

N_{arr} es el número de arranques de planta.

Función: propósito para el cual fue adquirido un componente/equipo/máquina. Debe ser definido para cada *contexto operacional* particular (ver numeral 6.3). La función debe expresarse de forma tal que pueda cuantificarse su pérdida. En otras palabras, la función debe expresarse en variables de ingeniería, inherentes al contexto operacional en estudio.

Falla funcional: Tipo de desperfecto o avería que reduce a cero la capacidad de cualquier elemento físico de satisfacer un criterio de funcionamiento deseado. Dicho de otra manera, es el tipo de falla por la cual un equipo deja de funcionar totalmente.

Falla parcial (potencial): Tipo de desperfecto o avería, o condiciones físicas identificables que indican que va a ocurrir una falla funcional. Estas fallas están por encima o por debajo de los parámetros identificados para cada función. Por ejemplo, el elemento no cumple un estándar o parámetro establecido de su servicio.

Modo de falla: corresponde a la descripción de las fallas funcionales/potenciales que pueden ocurrir. Posteriormente los modos de falla pueden ser clasificados en categorías (por mecánica, electricidad, instrumentación, etc.). Al definir el modo de falla se debe tener clara la causa u origen de la falla, para no confundir un modo de falla con un síntoma.

Efecto: síntoma generado por la ocurrencia de una falla potencial o funcional (ruido, vibración, goteo o fuga, elevación o disminución de una temperatura, etc.).

Causa: es el medio por el cual un elemento particular del proyecto o proceso resulta en un modo de falla.

El hecho de definir función, falla (funcional y potencial), modo de falla, efecto y causa, mejora significativamente los niveles de comprensión del componente/equipo/

máquina, y permite descubrir errores de procedimiento y mejorar la seguridad y operatividad de los equipos.

Consecuencia: efecto adverso último sobre el consumidor o usuario, generado por una falla funcional. Consumidor o usuario puede ser un usuario final (externo a la empresa) o la próxima operación dentro de un proceso productivo (usuario interno). RCM considera cuatro tipos de consecuencias y su definición dirá si vale la pena prevenir la ocurrencia de una falla en particular:

- **Consecuencias por fallas ocultas o no evidentes.** El ejercicio de descubrir este tipo de fallas reduce el riesgo de exponer una organización a fallas con consecuencias serias y hasta catastróficas
- **Consecuencias sobre la seguridad y el medio ambiente.** RCM pone la afectación a las personas y al medio ambiente por encima de las demás afectaciones.
- **Consecuencias operacionales.** Se cuantifican las afectaciones a la producción (cantidad, calidad, en el servicio, adicionales a la reparación normal de la máquina/equipo).
- **Consecuencias no operacionales.** Reparaciones normales,

Gravedad o severidad de la falla (G): indica como la falla afecta al usuario o cliente. La gravedad debe ser evaluada desde el punto de vista de la seguridad industrial, daños al medio ambiente, la producción, daños a la misma máquina/equipo, la calidad. La gravedad guarda estrecha relación con la consecuencia, y numéricamente se le dará el manejo descrito en el numeral 6.4.

Frecuencia (F): es la probabilidad de ocurrencia de la falla. Idealmente debiera extraerse a partir de estadísticas de falla, en caso contrario debe conocerse con muy buena aproximación el patrón de falla del proceso/máquina/equipo/componente y la fase por la cual está pasando actualmente.

Detectabilidad (D): indica el grado de facilidad en la detección de la falla dentro de los diferentes subsistemas, componentes y partes de la máquina/equipo.

6.3. Origen y evolución del RCM

En la década de 1950, en Estados Unidos., la frecuencia de ocurrencia de accidentes en vuelos aéreos era de sesenta por cada millón de despegues [57]; de estos accidentes dos terceras partes se debían a fallas de los equipos y el crecimiento

de los viajes aeronáuticos estaba en pleno auge. Si esa frecuencia fuera escalada a las condiciones actuales, se estaría hablando de un promedio de sesenta accidentes por mes y dos accidentes por día, en algún lugar del mundo, y teniendo en cuenta que la cantidad actual de vuelos de más de cien pasajeros es muy grande respecto de 1950, el panorama de la seguridad aérea sería escalofriante.

Dado este panorama, *Stanley Nowlan* y *Howard Heap* iniciaron una investigación muy concienzuda y meticulosa, sobre la accidentalidad de la aviación comercial de EE. UU. El estudio tenía como meta mejorar la seguridad aérea; la investigación duró aproximadamente veinte años y se condensó en el libro “*Reliability Centered Maintenance*” [57], mismo que dio nombre al sistema de mantenimiento objeto de este capítulo. Con base a este libro la *Air Transport Association of America* ATA publicó en 1968 el documento llamado Evaluación del mantenimiento y desarrollo del programa MSG - 1. Este documento sirvió de base para la planeación de programas de mantenimiento de fabricantes de aviones y aerolíneas. Con base en el MSG - 1, se publicó en 1980 el MSG - 3, el cual posteriormente fue revisado y actualizado en 1988 y en 1993.

El panorama actual de la accidentalidad de las aerolíneas en el mundo es alrededor de dos accidentes por cada millón de despegues [7]. Esta evolución se debe en gran medida a los cambios de paradigmas propiciados por los resultados de los estudios de *Nowlan* y *Heap*, volviendo a la aviación en la forma más segura de viajar. Algunos de los cambios de paradigma rotos por el estudio en mención son:

- La relación entre la edad de un componente y su desgaste (principalmente donde hay contacto con la materia prima, producto intermedio o terminado) o deterioro no es lineal.
- No todos los equipos/componentes se comportan de acuerdo con la “curva de la bañera” (Curva A de la tabla 24).
- Hay conexión entre la confiabilidad de un componente y la edad operacional.
- Cuanto más a menudo se revise menor es la probabilidad de falla.
- Un equipo posee de fábrica una capacidad para cumplir o no una función o cometido, y Mantenimiento no puede garantizar por sí mismo que esa capacidad sea aumentada.

Algunos de los nuevos paradigmas arrojados por el RCM son:

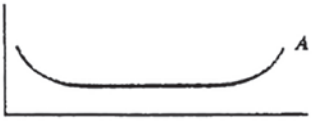
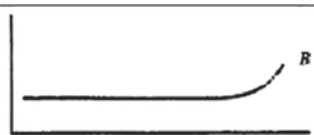
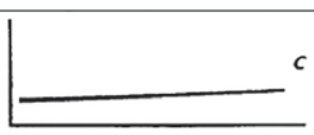
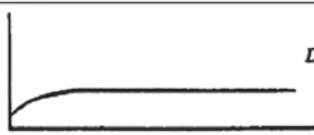
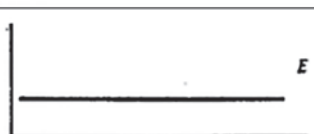
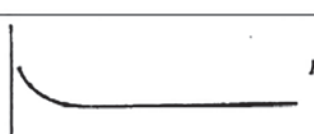
- No existe un único modelo de patrón de falla (el de “la bañera”), sino que

son seis patrones diferentes.

- Los modelos de patrón de falla dependen de la complejidad de las máquinas/equipos. Entre más complejos sean los equipos se comportarán de acuerdo con los patrones E y F, mientras que entre más simples sean, se comportarán de acuerdo con los modelos A, B y C.
- El RCM encontró que los efectos y consecuencias de una falla dependen de cada entorno productivo en particular, es decir reconoció el concepto de la trilogía máquina – operador – medio ambiente (ver *numeral 1.5.2*) o *contexto operacional*.
- La función que un equipo provee no es única, sino que depende del contexto operacional.
- Cada componente/equipo/máquina posee de fábrica su propia combinación de modos de falla y su propia intensidad de falla (*confiabilidad inherente*). Estos se pueden alterar (para mal) al introducirlo en un contexto operacional o trilogía máquina – operador – medio ambiente particular.
- Puesto que un componente/equipo/máquina es la suma de sus partes, cada una de las cuales poseen su propia confiabilidad, entonces será imposible obtener una confiabilidad superior (e incluso igual) a la del componente de mejor confiabilidad. La confiabilidad global es posible cuantificarla, gracias a los aportes y herramientas provistas por la Estadística y la Teoría de la Confiabilidad.
- Cualquier intento de definir un programa / plan o política de mantenimiento debe comenzar por la definición de las funciones o estándares de funcionamiento esperados en un contexto operacional.
- Mantenimiento lo único que puede hacer es garantizar que el componente/equipo/máquina provea su capacidad incorporada o su confiabilidad inherente.

En la Tabla 24 se grafica el comportamiento de los seis patrones de falla descritos por el RCM.

Tabla 24. Patrones de Falla de componentes de la industria aeronáutica de EE.UU. Tomado de [57]

11% podría beneficiarse de una edad límite de funcionamiento	4%	
	2%	
	5%	
89% no puede beneficiarse de una edad límite de funcionamiento	7%	
	14%	
	68%	

Curva A: Curva de la bañera. La máquina/equipo/componente posee alta mortalidad infantil, es decir tienen una probabilidad inicial de falla alta, luego de lo cual se estabilizan, para finalizar la vida útil en una zona de desgaste acelerada.

Curva B: El patrón de falla “ideal” y tradicional antes del RCM. Pocas fallas a lo largo de la vida útil, culminando en una zona de desgaste elevado.

Curva C: Un constante incremento de la probabilidad de falla infantil, seguida de un comportamiento aleatorio de la probabilidad de falla.

Curva D: Rápido crecimiento de la probabilidad de falla, seguida de un comportamiento aleatorio.

Curva E: Fallas aleatorias, sin ninguna relación entre la edad y la probabilidad de falla.

Curva F: Alta mortalidad infantil, seguida de un comportamiento de aleatorio de la probabilidad de fallos.

Solo en los patrones de Falla A, B, y C hay una relación predecible entre el desgaste del componente y su vida útil, sumando en los tiempos del estudio el 11% de los equipos/componentes de la industria aeronáutica. Por otro lado, los patrones que muestran una relación aleatoria entre la edad y el desgaste, es decir los patrones D, E y F, totalizaban el 89% de los equipos/componentes de dicha industria [57]; esta elevada aleatoriedad propició el advenimiento y desarrollo del *Mantenimiento Predictivo* en la década de 1970, con el objetivo de anticiparse y *predecir* la ocurrencia de fallas. El estudio de *Nowlan y Heap* [57] mostró que a mayor complejidad del equipo/componente, el comportamiento sus patrones de falla obedecían a los modelos D, E y F. Con todo este panorama de nuevos conceptos, conocimientos, paradigmas tradicionales rotos y nuevos paradigmas, fue diseñada la metodología RCM, la cual será descrita en el *numeral 6.4*.

6.4. Metodología de aplicación

A continuación, se describe un modelo de aplicación de RCM en un proceso productivo completo y grande (gran empresa Capítulo 2).

6.4.1. Efectuar un Análisis de criticidad CA

Un análisis de criticidad permite identificar las áreas y secciones o grupos (ver *numeral 3.2.2*) más críticas de la planta; una vez definidas éstas, el CA permite definir las máquinas/equipos más críticos dentro de dichas áreas o secciones. Las máquinas/equipos serán llamados *sistemas*.

Un CA se obtiene aplicando la fórmula 16, por áreas, posteriormente por secciones, y luego por máquinas/equipos. La *Gravedad G* debe ser definida por equipos de trabajo multidisciplinarios (producción, mantenimiento, control de calidad, salud ocupacional, seguridad industrial, división financiera, etc.).

$$CA = G \times F \quad (16)$$

Donde

- CA es el valor del análisis de criticidad;
 G es la gravedad de la ocurrencia de una falla en un área o sección;
 F es la frecuencia de ocurrencia de la falla.

Tabla 25. Categorías de Gravedad o severidad. Tomado de [58]

Clasificación	Efecto	Comentario
1	Ninguno	No hay razón para esperar que una falla tenga efecto alguno sobre la seguridad, la salud, el medio ambiente o la misión.
2	Muy bajo	Interrupción menor a la función de las instalaciones. Reparación de la falla puede ser realizada durante el llamado del problema
3	Bajo	Interrupción menor a la función de las instalaciones. Reparación de la falla puede ser más larga que el llamado del problema, pero no retrasa la misión.
4	Bajo a moderado	Moderada interrupción a la función de las instalaciones. Alguna parte de la misión puede necesitar ser reprocesada o el proceso es atrasado.
5	Moderado	Moderada interrupción a la función de las instalaciones. 100% de la misión puede requerir ser reprocesada o el proceso es atrasado.
6	Moderado a alto	Moderada interrupción a la función de las instalaciones. Alguna parte de la misión se pierde. Significativa espera para restaurar la función.
7	Alto	Elevada interrupción a la función de las instalaciones. Alguna parte de la misión se pierde. Significativa espera para restaurar la función.
8	Muy alto	Elevada interrupción a la función de las instalaciones. Todo o parte de la misión se pierde. Significativa espera para restaurar la función.
9	Peligroso	Potencial problema de seguridad, salud o ambiental. Fallas pueden ocurrir con advertencia.
10	Peligroso	Potencial problema de seguridad, salud o ambiental. Fallas pueden ocurrir sin advertencia.

Hasta donde sea posible es pertinente conocer el patrón de falla de la máquina/equipo y su *Frecuencia de falla F*, que idealmente debe definirse con base a estadísticas de falla. Una guía muy seria para la selección de los valores de G y F es la mostrada por las tablas 25 y 26.

6.4.2. Determinar la criticidad de los subsistemas

Una vez detectadas las máquinas/equipos críticos se pasa a realizarles un Análisis de Modo y Efecto de la Falla *AMEF* o *Failure Mode and effect Analysis FMEA*, el cual busca determinar los subsistemas críticos, para posteriormente plantear estrategias de solución. El AMEF es una metodología que pretende determinar el Índice de Riesgo o Número de Prioridad de Riesgo *NPR*, aplicando el procedimiento descrito a continuación y luego la fórmula 17.

Tabla 26. Categorías de Probabilidad de ocurrencia Tomado de [58]

Clasificación	Efecto	Comentario
1	1 / 10 000	Remota probabilidad de ocurrencia; irrazonable esperar que la falla pueda ocurrir.
2	1 / 5000	Baja razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron bajas razones de falla para ciertos volúmenes/cargas.
3	1 / 2 000	Baja razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron bajas razones de falla para ciertos volúmenes/cargas.
4	1 / 1 000	Razón de falla ocasional. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron similares razones de falla para ciertos volúmenes/cargas
5	1 / 500	Moderada razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron moderadas razones de falla para ciertos volúmenes/cargas.
6	1 / 200	Moderada a alta razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron moderadas razones de falla para ciertos volúmenes/cargas.
7	1 / 100	Alta razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron altas razones de falla, que causaron problemas.
8	1 / 50	Alta razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron altas razones de falla, que causaron problemas.
9	1 / 20	Muy alta razón de falla. Mucha certeza de causar problemas.
10	1 / 10+	Muy alta razón de falla. Mucha certeza de causar problemas.

Análisis AMEF. Aplicar la metodología descrita a continuación, asegura que se respondan satisfactoriamente y en la secuencia indicada una serie de preguntas, que proporcionarán un conocimiento del proceso productivo y de la función de las máquinas/equipos, referenciados a un contexto productivo o contexto operacional:

- a. ¿Cuáles son las funciones y los modelos ideales de rendimiento del recurso en el actual contexto operativo (Funciones principales y secundarias)?
- b. ¿En qué formas no puede cumplir sus funciones (fallas funcionales y funcionales)?

Se trata de describir los modos de falla funcionales y potenciales (¿en qué condiciones el equipamiento falla?

- c. ¿Qué ocasiona cada falla funcional? es decir, definir la causa. Posteriormente clasificar las fallas en categorías o modos de falla (mecánicas, eléctricas, lubricación, instrumentación), haciendo la respectiva descripción.
- d. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla (**efectos y consecuencias de la falla**)?

Recordar que el efecto es diferente de la consecuencia

Con esto se describe el efecto potencial de la falla, y surgen otras preguntas: ¿ocurrirá parada de la producción? ¿Ocurre reducción de la producción? ¿La calidad del producto es afectada? ¿Cuáles son los daños provocados? El responder las preguntas anteriores ayudará a determinar las consecuencias (sobre la seguridad personal, sobre el medio ambiente, sobre la producción, sobre la calidad, etc.) y la Gravedad.

- e. ¿Cuál es la Gravedad o Severidad de la falla? Tabla 25 (opcional) y 27.
- f. ¿Cuál es la Frecuencia de la falla? Tablas 26 (opcional) y 27.
- g. ¿Cuál es la Detectabilidad de la falla? Tabla 27.
- h. Una vez respondidas las preguntas anteriores, se debe calcular el NPR (fórmula 17).

$$NPR = F \times G \times D \quad (17)$$

Donde

- NPR* es el número de prioridad de riesgo;
- F* es la frecuencia de ocurrencia de la falla, en un subsistema;
- G* es la gravedad de la ocurrencia de una falla;
- D* es la Detectabilidad o facilidad para encontrar la falla.

- i. Clasificar el valor de NPR obtenido, con la ayuda de la tabla 27, lo cual indicará la criticidad del subsistema.

6.4.3. Toma de decisiones a partir de los análisis arrojados

Una vez definidos los subsistemas más críticos, entonces debe pasarse al desarrollo de planes de acción para eliminar o corregir el problema potencial. Se debe responder la pregunta ¿Qué debe hacerse para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas e intervalos de labores)? En este punto son de mucha ayuda los análisis causa-raíz o espina de pescado y puede haber apoyo de la cadena de razonamiento lógico de la Figura 107, propuesta en la guía para aplicación de RCM propuesta por la NASA [58], en cuanto a la determinación del modo de proceder con respecto a los escenarios de falla encontrados, llegando a cinco soluciones posibles:

- Aceptar el riesgo de la falla
- Instalar unidades redundantes o en paralelo.
- Definir actividades de Mantenimiento Preventivo *PM*.
- Programar actividades de Mantenimiento Predictivo *PdM*.
- Proponer rediseño del sistema

Tabla 27. Valores recomendados para la evaluación del NPR. Tomado de [59]

Componente del NPR	Clasificación	Peso
Gravedad de la falla (G)	Apenas imperceptible	1
	Poca importancia	2 a 3
	Moderadamente grave	4 a 6
	Grave	7 a 8
	Extremadamente grave	9 a 10
Frecuencia de ocurrencia	Improbable	1
	Muy pequeña	2 a 3
	Pequeña	4 a 6
	Media	7 a 8
	Alta	9 a 10
Detectabilidad (D)	Alta	1
	Moderada	2 a 5
	Pequeña	6 a 8
	Muy pequeña	9
	Improbable	10
Índice de Riesgo (NPR)	Bajo	1 a 50
	Medio	50 a 100
	Alto	100 a 200
	Muy alto	200 a 1000

Aceptación del riesgo de la falla. Cuando no resulta viable por razones de prioridad, costos y variabilidad de las frecuencias de falla, aplicar tareas de mantenimiento preventivo, se asume el riesgo de la falla y se estudia la posibilidad de realizar un monitoreo constante del sistema, subsistema o componente, aplicando tareas básicas de lubricación y servicio.

Instalación de unidad redundante Consiste en proveer al sistema de un equipo alternativo, el cual se ponga en marcha en caso de falla de alguno de los componentes y realice un reemplazo temporal. Ampliamente aplicado en mantenimiento industrial (tuberías, compresores, bombas). No aplica en equipos automovilísticos, debido a que los componentes principales de los vehículos usualmente son unitarios.

Tareas de mantenimiento preventivo Ampliamente usado en los campos industrial y automovilístico. Industrial: inspecciones antes, durante y al finalizar la jornada; cambios, ajustes, calibraciones a determinadas frecuencias (horas de servicio,

horas transcurridas, unidades producidas, etc.). Automovilístico: revisiones diarias antes de la salida de cada equipo y durante periodos determinados por la distancia recorrida y recomendados en su gran mayoría por el fabricante del vehículo. En general, se recomienda realizar tareas de MP si el costo de ejecutarlas durante un cierto período de interés es menor a los costos de reparar y al de las consecuencias operacionales.

Tareas de mantenimiento Predictivo Es común en el mantenimiento industrial hacerse de métodos de predicción de fallas, como los análisis de vibraciones, análisis termográficos, pruebas de tintas penetrantes, etc. En el mantenimiento de automóviles, las herramientas más poderosas son las alarmas dispuestas en el tablero de control del vehículo que permiten un monitoreo constante del equipo y los análisis de aceite usado (ver *Capítulo 5*).

Rediseño del sistema. Por lo general aplicado en mantenimiento industrial, específicamente en el movimiento de fluidos; este tipo de propuesta hace modificaciones de forma y funcionamiento en el sistema, las cuales son apropiadas si los análisis de costos lo indican. En el mantenimiento vehicular, es posible aplicar esta propuesta haciéndole llegar a los proveedores de vehículos, las apreciaciones que uno tiene de sus productos y de igual forma, cuando se tiene la opción de escoger las marcas de los componentes del vehículo como el motor, la caja, los filtros, etc., se puede diseñar una configuración “óptima”, con componentes durables, mayores periodos de mantenimiento preventivo y mejor desempeño. En general, se recomienda rediseñar el sistema, si no se puede encontrar una tarea o grupo de tareas que puedan reducir el riesgo a un valor aceptable. Por último, y como una opción B, se debe trazar un panorama en el sentido de ¿Qué debe hacerse si una tarea proactiva adecuada no puede ser encontrada o se aplicó, pero el efecto no fue el esperado (Acciones por defecto o remediales)? Estas acciones por defecto o remediales son propias de cada contexto operativo.

6.4.4. Ventajas de aplicar RCM

RCM nació para mejorar la seguridad en la industria aeronáutica (una industria de servicio), y efectivamente lo ha logrado, pero también ha mostrado resultados muy exitosos en industrias del sector primario, secundario y de servicios tales como: Minería, plantas petroquímicas, plantas de gas, bombas y compresores en sitios remotos, plantas de fundición y refinación de metales, plantas de pulpa de papel, plantas alimenticias y de bebidas, flotas de camiones de transporte [7].

Algunas ventajas generales de aplicar el RCM son:

- Mejoramiento de la seguridad y el cuidado del medio ambiente. Recordar que RCM prioriza la afectación a las personas y al entorno.
- Mejoramiento de los rendimientos operativos, porque se reduce significativamente la cantidad y severidad de las fallas, y como se adquiere un mejor conocimiento de las máquinas/equipos, se simplifican y mejoran los procedimientos operativos a pie de máquina.
- Disminución de los costos totales de mantenimiento rutinario, porque se reduce la cantidad y complejidad de las tareas de mantenimiento.
- Se propicia el trabajo multidisciplinario, promoviendo el trabajo en equipo con relaciones armoniosas y colaborativas entre diversas dependencias de la compañía.
- Se garantiza el cumplimiento de la vida útil de las máquinas/equipos al aplicar Mantenimiento predictivo.
- Si RCM se aplicara en una empresa que tiene implementado el Mantenimiento Preventivo, la carga de trabajo rutinaria preventiva se puede reducir entre un 40% y un 70%. La razón de esta reducción es que el Mantenimiento Preventivo aplica a los diversos equipos, concienzudamente a cada cierta frecuencia, las tareas recomendadas por el fabricante y las sugeridas por la experiencia, sin importar mucho la criticidad de la máquina dentro del proceso productivo, mientras que en el RCM, primeramente se desarrolla un análisis de criticidad CA por áreas y secciones para identificar las máquinas/equipos más críticos, seguidamente se aplica el análisis AMEF para determinar la criticidad (NPR) de cada subsistema dentro de las máquinas/equipos críticos, y por último se concentran los esfuerzos en dichos subsistemas. Si RCM se aplicara para desarrollar un nuevo sistema de Mantenimiento en una empresa, el resultado sería que la carga de trabajo de mantenimiento será mucho menor que si el sistema se hubiese desarrollado por los métodos convencionales (sistema LEMI).
- Se crea (si no se disponía) o se mejora la base de datos mantenimiento, gracias a la adecuada aplicación de los análisis AMEF y de la elaboración y documentación de los consecuentes planes de acción.

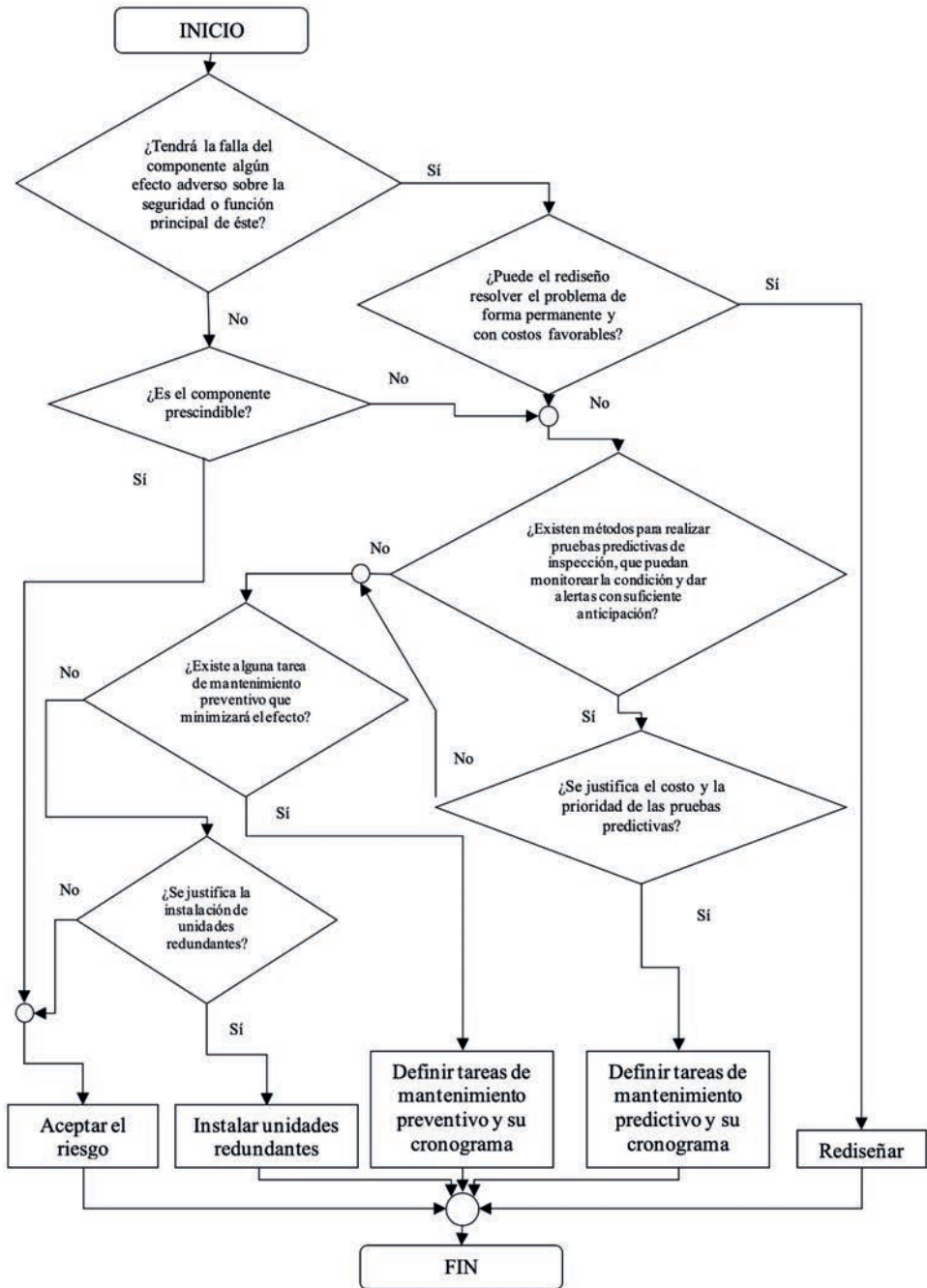
6.4.5. RCM y TPM como sistemas de mantenimiento complementarios

A pesar de que el TPM y RCM persiguen objetivos diferentes, es decir, mientras

el primero premia la *Productividad*, el segundo premia la *Confiabilidad* del proceso productivo en un cierto contexto operativo, es posible identificar aspectos y métodos comunes a ambos sistemas:

- Ambos requieren de la aprobación y compromiso de la alta gerencia para su implementación.
- Ambos requieren de la colaboración de todo el personal de la empresa, para que sea exitosa y duradera su implementación.
- Ambos propician y necesitan de trabajo en equipo.
- Ambos aplican Mantenimiento Preventivo. TPM es una mejora y evolución del MP, y lo aplica de manera tradicional, es decir de manera rigurosa y a veces en exceso. En el RCM, el MP aparece como una de cinco soluciones posibles, pero con una salvedad, aparece “optimizado” o adelgazado.

Figura 106. Cadena de razonamiento RCM. Tomado de [58]



6.5. Ejercicio propuesto

La Figura 108 ilustra el esquema general para producción de panela utilizando vapor.

- Hacer las consultas necesarias y aplicar el método propuesto en el *Capítulo 9*, para la comprensión del funcionamiento del equipo.
- Explicar las ventajas del sistema asistido por vapor, frente al de hornilla tradicional.

Aplicar la metodología RCM propuesta en el *numeral 6.4* para determinar la criticidad (NPR) de los subsistemas del sistema de producción de panela utilizando vapor. Puesto que se analizará al interior de un equipo, se omitirá el análisis de criticidad descrito en el numeral 6.4.1.

Subsistema 1 a analizar : Bomba de condensado.

Subsistema 2 a analizar : Bomba de jugo.

Defina:

Función sistema :

Función subsistema 1 :

Función subsistema 2 :

Fallas funcionales cada subsistema (listado) :

Fallas potenciales cada subsistema (listado) :

Modos de falla cada subsistema :

De los listados elaborados, para cada subsistema elija una falla funcional en particular:

Subsistema 1: _____

Subsistema 2: _____

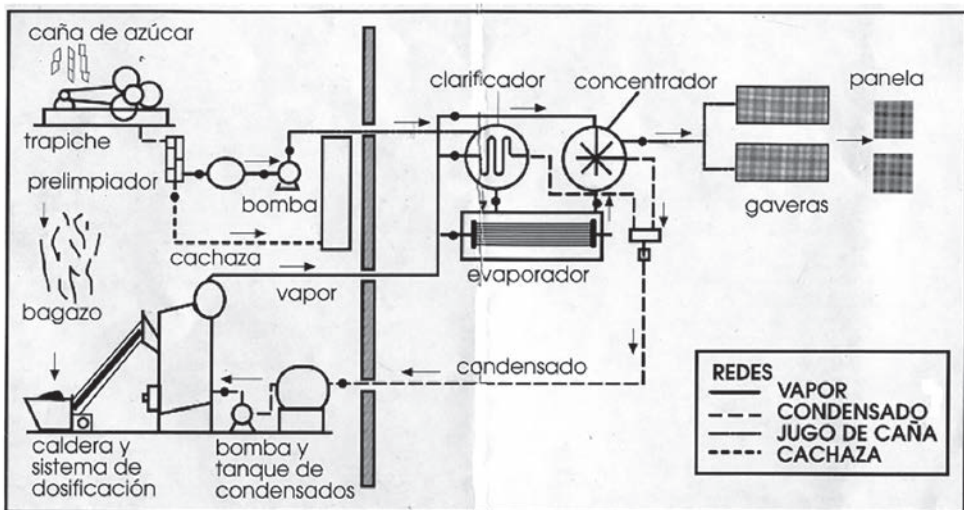
Para cada falla funcional defina:

Efectos :

- Consecuencias :
- Causas :
- Gravedad (Tabla 27) :
- Frecuencia (Tabla 27) :
- Detectabilidad (Tabla 27) :
- NPR :

Aplice la cadena de razonamiento lógico de la Figura 107 y proponga un Plan de Acción acorde al resultado o solución hallada.

Figura 107. Sistema de producción de panela utilizando vapor
Tomado de [3]



6.6. Caso de estudio. Ejemplo de aplicación parcial de RCM

A continuación, se presenta un ejemplo de cómo se aplicó RCM para diseñar un plan de mantenimiento preventivo en una empresa de servicios del eje cafetero. La aplicación en mención fue desarrollada por (2 estudiantes de Ingeniería Mecánica de la UTP como trabajo de grado [Tomada de 60]. La tabla 28 relaciona los equipos disponibles en cada ciudad y taller. Como se puede apreciar su cantidad total era de 289 equipos. Si se fuera a aplicar el método tradicional LEMI, habría sido necesario estudiar y definir tareas para todos y cada uno de estos equipos.

Tabla 28. Resumen inventario inicial máquinas

Ciudad	Taller	Cantidad	Total
ARMENIA	Taller principal	50	80
	Taller diesel	10	
	Chevy Express	20	
CARTAGO	Chevy Express Cartago	18	18
PEREIRA	Chevy Express circunvalar	45	191
	Pintu Express	18	
	Taller diesel	23	
	Taller principal	105	
	Total	289	

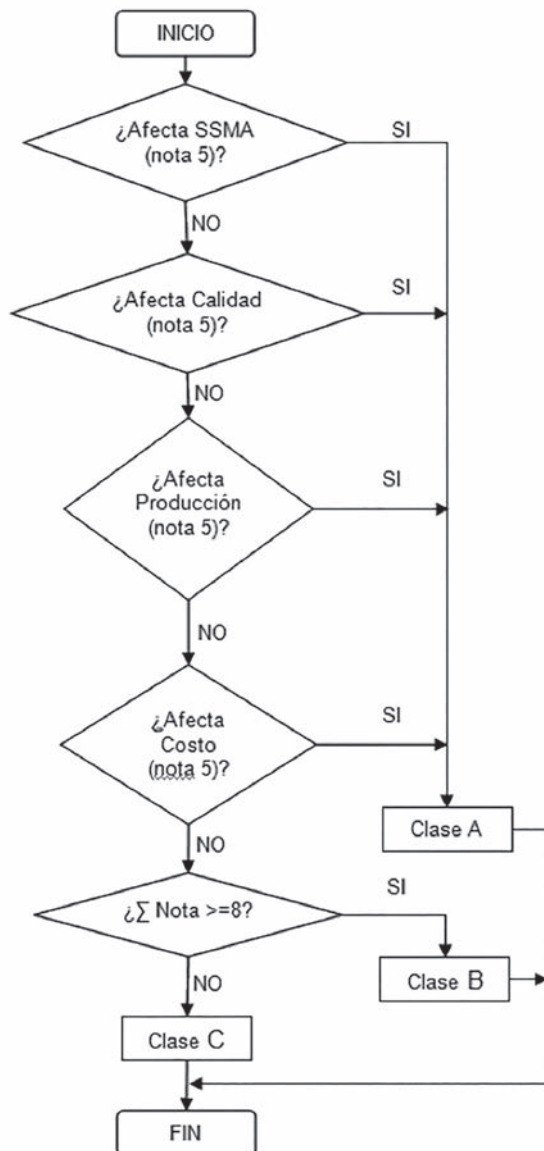
Ante la cantidad de trabajo que se avecinaba y debido a la duda de cuáles equipos eran más críticos para el proceso, se diseñó la matriz de valoración de riesgo mostrada en la tabla 29. En dicha tabla se valoran afectaciones a la Seguridad, Salud, Medio ambiente, calidad de servicio, producción y por último Mantenimiento.

Tabla 29. Matriz de riesgo. Tomado de [60]

¿Afecta SSMA (Seguridad, Salud y Medio Ambiente) de forma significativa?	5	Causa fatalidad o accidentes serios que provocan incapacidad condición de salud irreversible	
		Daños a largo plazo o esparcidos al ambiente	
		Equipos controlados por la legislación	
	3	Lesiones leves	
		Pequeño impacto financiero sobre el negocio	
		Efectos nocivos para la salud de una o más personas	
		Perturbación ecológica de baja duración y/o impactos restringidos en el área ambiental	
	1	Pequeña pérdida financiera (primeros auxilios)	
		Efectos leves para la salud	
		No afecta al medio ambiente	
	¿Afecta a la calidad del producto?	5	Afecta a la calidad del producto final
		3	Afecta al producto para el cliente interno (no afecta al cliente externo, es posible la recuperación)
1		No afecta a la calidad o especificaciones del producto	
¿Afecta a la producción?	5	Afecta a la meta mensual de producción de la planta (irrecuperable)	
	3	Afecta a la producción de la planta (no afecta a la meta mensual, recuperable)	
	1	No afecta a la producción	
¿Costo de mantenimiento elevado?	5	Genera un coste de mantenimiento igual o superior al 5% del costo mensual de mantenimiento	
	3	Genera un costo de mantenimiento entre un 2% y un 5% del coste mensual de mantenimiento	
	1	No afecta significativamente el costo de mantenimiento	

Posteriormente, se propuso un orden de aplicación y unos criterios de clasificación, tal como lo muestra el diagrama de flujo de la Figura 109. Se puede apreciar que se definieron unos equipos Clase A (más críticos), Clase B (Importantes) y Clase C (no importantes, pero no prescindibles).

Figura 108. Diagrama de flujo de clasificación de equipos. Tomado de [60]



La herramienta inicialmente diseñada (Matriz de riesgo y diagrama de flujo) se le presentó a la gerencia, a los departamentos de producción y mantenimiento y con algunos ajustes, estuvieron de acuerdo en su pertinencia, siendo aprobada para su aplicación. Posteriormente y en compañía de personal de la empresa se les aplicó a

los 289 equipos totalizados en la tabla 28. La tabla 30 y la Figura 110 presentan un ejemplo de aplicación de la matriz de riesgo y del diagrama de flujo, para un equipo en particular que resultó ser valorado en clase B.

Equipo: Taladro Neumático. Código: TN.

Función: Herramienta para mecanizar agujeros de hasta $A\Phi$ (mm), en láminas de hasta calibre 18 (para carrocería).

Cantidad (Taller principal, Armenia): 5.

Tabla 30. Ejemplo de aplicación matriz de riesgo a Taladro neumático TN
Tomado de [60]

¿Afecta SSMA de forma significativa?	1	Pequeña pérdida financiera (primeros auxilios)
		Efectos leves para la salud
		No afecta al medio ambiente
¿Afecta a la calidad del producto?	1	No afecta a la calidad o especificaciones del producto
¿Afecta a la producción?	3	Afecta a la producción de la planta (no afecta a la meta mensual, recuperable)
¿Costo de mantenimiento elevado?	3	Genera un costo de mantenimiento entre un 2% y un 5% del coste mensual de mantenimiento

Finalmente, de la aplicación global efectuada se llegó a los resultados mostrados en la tabla 31, donde se puede apreciar que, de **289 equipos inicialmente disponibles** se pasó a **83 equipos Clase A**. Sobre estos 83 equipos trabajaron los estudiantes y los demás quedaron disponibles para que otros estudiantes (o personal de la empresa) definieran posteriormente la cantidad y rigurosidad de tareas a efectuarles.

Figura 109. Ejemplo de aplicación del diagrama de flujo a taladro TN
Tomado de [60]

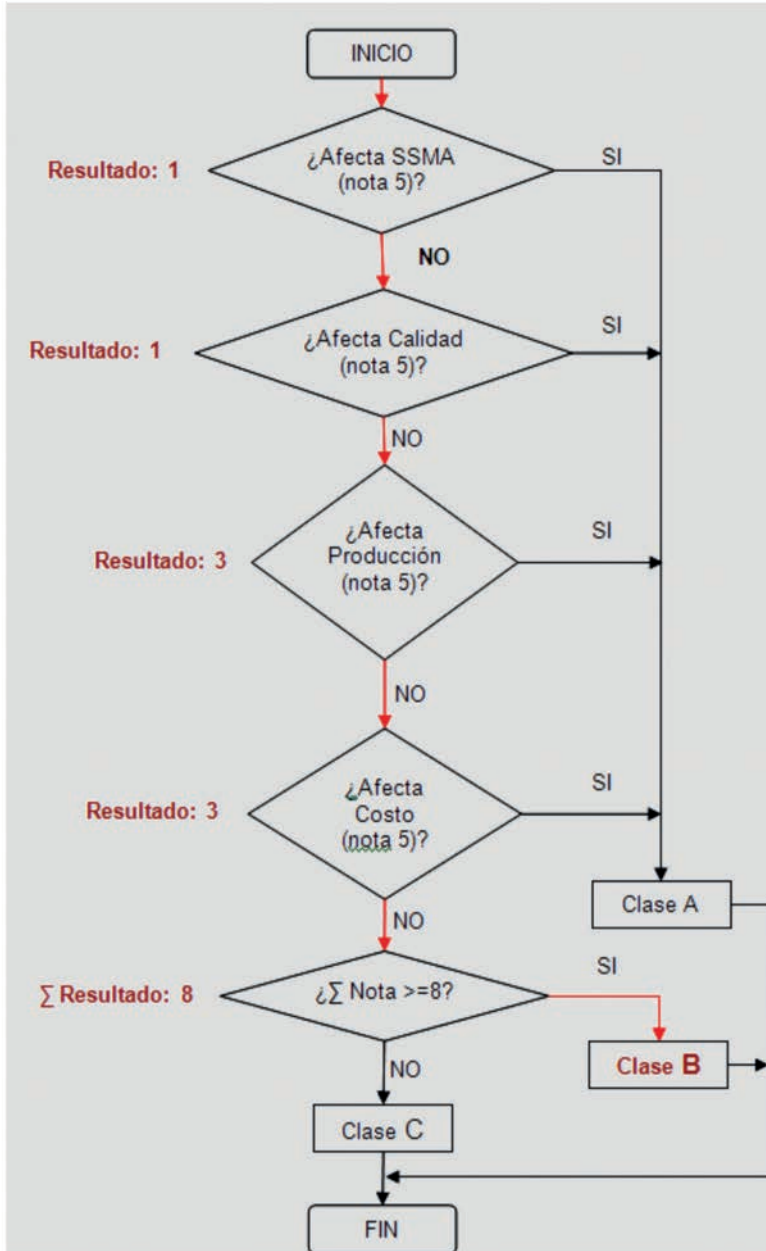


Tabla 31. Resultados de clasificación. Tomado de [60]

		CRITICIDAD			
Ciudad	Taller	Tipo A (críticos)	Tipo B (importantes)	Tipo C (no importantes)	Totales
Armenia	Taller principal	17	16	17	50
	Taller diesel	1	1	8	10
	Chevy Express	5	3	12	20
Cartago	Chevy Express Cartago	6	2	10	18
Pereira	Chevy Express circunvalar	12	11	22	45
	Pintu Express	6	6	6	18
	Taller diesel	3	7	13	23
	Taller principal	33	51	21	105
Total		83	97	109	289

En la bibliografía [61] se puede consultar un caso de aplicación de RCM a una flota de camiones de cargar interdepartamental, y en la bibliografía [62] se puede consultar un caso muy exitoso de aplicación de RCM en una planta minera de gran envergadura.

CAPÍTULO SIETE

Mantenimiento Basado en el Riesgo RBM

7.1. Introducción

El Mantenimiento Basado en el Riesgo *RBM* (*Risk Based Maintenance RBM* por sus siglas en inglés) es un sistema de mantenimiento cuyo objetivo es *reducir el riesgo* general de ocurrencia de fallas catastróficas en las instalaciones industriales, hasta llevarlo a un nivel aceptable de acuerdo con normas. El RBM es muy apropiado cuando se trata con instalaciones donde se transportan, producen y manejan productos tóxicos o peligrosos (petroquímicas, plantas nucleares, desechos biológicos, etc.).

A diferencia del TPM donde se premia la Productividad, y del RCM donde prima la Confiabilidad, el RBM estudia los procesos productivos y los evalúa en función de la probabilidad de ocurrencia de una falla catastrófica, es decir, aquella que afecta la salud de las personas, el medio ambiente o las instalaciones, y de las consecuencias que acarrearía su ocurrencia (Figura 14, numeral 1.5.7). En RBM se direccionan los recursos de la organización hacia las instalaciones/máquinas/equipos que un análisis Probabilidad - Riesgo determine que son los más peligrosos. El área verde (Figura 14. Capítulo 1) indica que hay poca probabilidad que una máquina/equipo *A* falle de manera catastrófica y en el caso que ocurriese, las consecuencias serían poco importantes. Por el contrario, para una máquina/equipo *B*, ubicado en la región roja indicaría una alta probabilidad de que ocurra una falla catastrófica, y las consecuencias serían elevadas, por lo tanto, a la máquina *B* hay que aplicarle planes de acción más elaborados y asignarle mayores recursos que a la máquina *A*. La dirección y aplicación del RBM lo hacen equipos multidisciplinarios de profesionales.

Es necesario tener en cuenta que el Riesgo se calcula de acuerdo con la fórmula 18:

$$R = F \times C \quad (18)$$

Donde

- R* es el riesgo;
- F* es la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de una avería;
- C* es la consecuencia que acarrea la ocurrencia de la avería.

7.2. Algunos antecedentes del manejo del riesgo

7.2.1. Normatividad sobre riesgo en instalaciones industriales

- Antes de la década de 1980 no había en el mundo reglamentación clara sobre disposición final de residuos peligrosos, y muy *hábil y convenientemente* los países industrializados enviaban sus desechos tóxicos a los países más pobres de África, Asia o América.
- A finales de la década de 1980, los países industrializados comenzaron a definir normas sobre disposición de residuos, y se tomó conciencia de que disponer residuos adecuadamente acarrearía unos altos costos. Son conocidos incidentes de buques cargados con residuos peligrosos, deambulando por diversos puertos del mundo y siendo rechazados, como los buques *Katrin B* y *Pelicano*.
- **Convención de Basilea.** Firmada en 1989. Entró en rigor en 1992. Fue firmada por más de 170 países. Emitió Normas para el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su posterior eliminación. Estas normas estaban dirigidas a la protección de la salud y el medio ambiente.
- **Acuerdo de Estocolmo.** Firmado en 2001. Entró en rigor en 2004. Fue firmada por más de 172 países. Este acuerdo definió políticas para el manejo de contaminantes Orgánicos persistentes (*COP's*) y para tratamiento de sustancias tóxicas tales como pesticidas, *PCB's* (policloruro de bifenilo), dioxinas y furanos.

7.2.2. Algunos mega-accidentes previos a las convenciones

Antes de la firma de la Convención de Basilea y del acuerdo de Estocolmo ocurrieron algunos mega-accidentes, los cuales serán ilustrados de manera somera, para dar una idea al lector de lo que es un mega-accidente.

Accidente del superpetrolero Exxon Valdez (Figuras 111 y 112)

Alaska, Estados Unidos. 1989. Derrame de 37 000 ton de petróleo crudo, durante una labor errática de atraque del buque, lo cual causó su encallamiento.

Consecuencias inmediatas: cero muertes. 2000 km costa afectados. Costo: US 2500 millones.

Causa probable: el capitán del superpetrolero estaba ebrio y condujo mal la

operación de atraque en el puerto. Su licencia como marino fue suspendida de por vida.

Consecuencia a largo plazo: La afectación a la fauna y flora costera ha sido irreversible. A 2014, al excavar a unos cuantos cm de profundidad en la playa aún hay petróleo crudo.

Figura 110. Intentos fallidos de contener el derrame de petróleo de Exxon Valdez Tomado de [63]



Figura 111. Limpieza de las orillas de Prince William Sound
(Alaska - EEUU) Tomado de [64]



Accidente Bhopal, India. 1984 (Figuras 113 y 114)

Planta de pesticidas *Union Carbide (Eveready)*. Planta construida en el estado de Madhya por *Union Carbide* para producir pesticidas. El principal componente intermedio en el proceso era el Isocianato de Metilo (MIC). Se presentó una fuga de 42 toneladas de MIC, que se convirtieron en cianuro de hidrógeno. Se formó una nube tóxica a baja altura y sumamente letal. La nube en cuestión mató a la población que encontró a su paso, antes de diluirse.

Consecuencias inmediatas: 8 000 muertes. La planta fue abandonada y la empresa no respondió.

Causa probable: Falta de precauciones durante tareas de limpieza y mantenimiento de la Planta. Los sistemas de control de fugas y derrames estaban inoperantes por ¡ahorro de costos en mantenimiento!

Consecuencia a largo plazo: 25 000 muertes más en largo plazo. 600 000 afectados a muy largo plazo. Al cabo de los años, en 2010 hubo un juicio cuya sanción

fue una multa de €8900 y 2 años de cárcel a siete directivos de la empresa

Figura 112. Esquema general de accidente en la planta Unión Carbide
Tomado de [65]

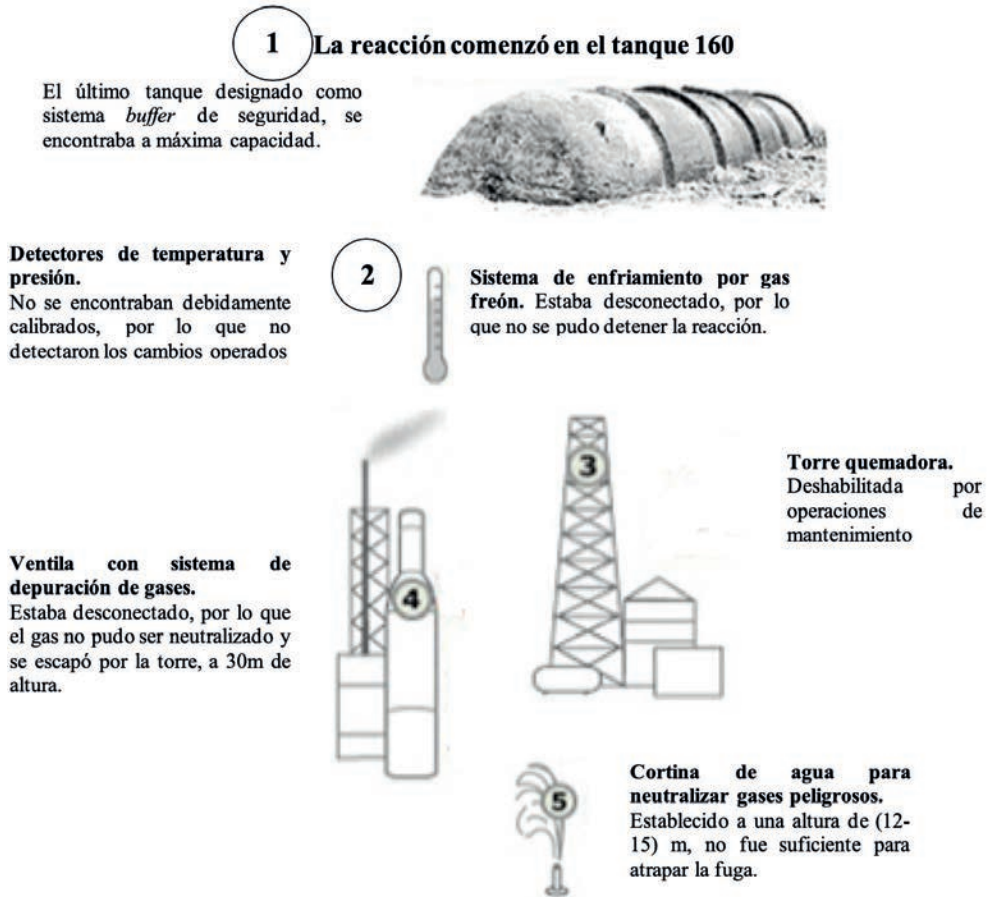


Figura 113. Nube tóxica de MIC sobre Bhopal. Tomado de [66]



Accidente nuclear de Chernóbyl (actual Ucrania – antigua URSS). 1986
(Figuras 115 y 116)

Planta nuclear con fines pacíficos (para generar electricidad industrial), contaba con cuatro reactores. En uno de los reactores se condujo una prueba de seguridad industrial, simulando una ausencia de energía eléctrica para enfriar el núcleo del mismo; la prueba fue mal conducida y se llevó al reactor más allá de la temperatura de control con lo cual el sistema se hizo no lineal e inestable, finalmente estalló y produjo la mayor catástrofe nuclear de la historia de la humanidad. La energía liberada fue 500 veces superior a la de Hiroshima – Japón en 1945. Los trabajos de contención posterior al accidente evitaron una explosión que hubiera podido tener efectos apocalípticos sobre toda Europa.

Consecuencias inmediatas: 31 muertes. Severa contaminación de un área de 30 km de radio.

Causa probable: Ignorancia y prepotencia del funcionario que dirigió la prueba de seguridad industrial. Falta de protocolos de seguridad precisos.

Consecuencia a largo plazo: 135 000 muertes en el largo plazo. Mutaciones

genéticas. Costo: US 200 000 millones. Factor de colapso de la antigua Unión Soviética. La planta fue encerrada en un sarcófago gigantesco para confinar la radiación, el cual estuvo a punto de colapsar, por lo que con recursos internacionales en julio de 2019 se culminó la construcción de un nuevo sarcófago (Figura 78).

Figura 114. Imagen aérea de la planta de Chernóbil, posterior a la explosión
Tomado de [67]



Figura 115. Imagen del sarcófago que se culminó de construir en julio de 2019,
para contener la radiación del reactor siniestrado Tomado de [68]



Estructura terminada
y en posición

Fuente: Novarka

7.2.3. Algunas Premisas en RBM

- El Riesgo es inherente a toda actividad humana.
- El Riesgo no se puede eliminar, pero se puede disminuir la probabilidad de ocurrencia de una catástrofe y las posibles consecuencias cuando ocurra.
- Las Compañías deben garantizar la seguridad a sus trabajadores y al medio ambiente.
- No puede haber desarrollo sostenible sin preservar la seguridad.

7.3. Algunos términos y definiciones para tener en cuenta en RBM

Riesgo: medida de la probabilidad y consecuencia de un efecto adverso (sobre las personas, medio ambiente, máquinas/equipos/instalaciones, actividad productiva o de servicios).

Safety Integrity Level SIL: Nivel de integridad de seguridad. Es una medida del desempeño que debe alcanzar un sistema instrumentado de seguridad. *No es una medida del riesgo de un proceso.* Ejemplo, “Nuestro proceso es SIL 3”.

Sistema Instrumentado de Seguridad SIS: Un SIS es un sistema independiente a una planta o proceso, compuesto de sensores, procesadores y elementos finales de control, con la finalidad de llevar el proceso a un estado seguro cuando ciertas y predeterminadas condiciones han sido violadas. Cada SIS tendrá un SIL asociado.

7.4. Metodología general para la definición y aplicación de un plan de mantenimiento RBM

La Figura 117 presenta un diagrama de flujo general que ilustra un modelo de desarrollo, aplicación y evaluación de un plan de mantenimiento RBM. Cabe resaltar que RBM hace uso de herramientas estadísticas, las cuales no se presentarán, razón por la cual lo reseñado es meramente descriptivo.

De la Figura 117, la actividad principal *Estimación del Riesgo* puede ser desagregada en otras actividades, tal como lo muestra la Figura 118. De nuevo, de la Figura 117, la actividad principal *Evaluación del Riesgo* puede ser desagregada en otras actividades, tal como lo muestra la Figura 119. Está resaltado el cuadro *Definir claramente el criterio de aceptación del Riesgo*, es decir, definir el SIL del proceso.

Por último, de la Figura 117, la actividad principal *Planeación del Mantenimiento* puede ser desagregada en otras actividades, tal como lo muestra la Figura 120.

Figura 116. Metodología general para seguir en RBM. Tomado de [69]

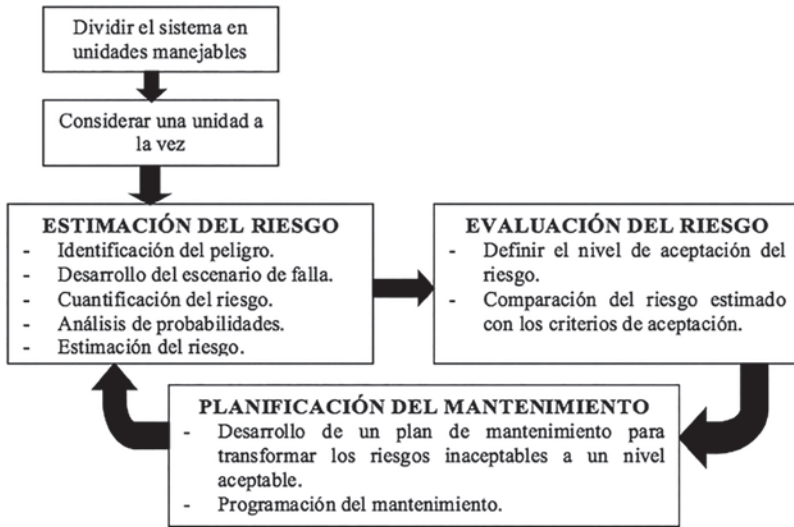


Figura 117. Diagrama de flujo para la Estimación del riesgo. Tomado de [69]

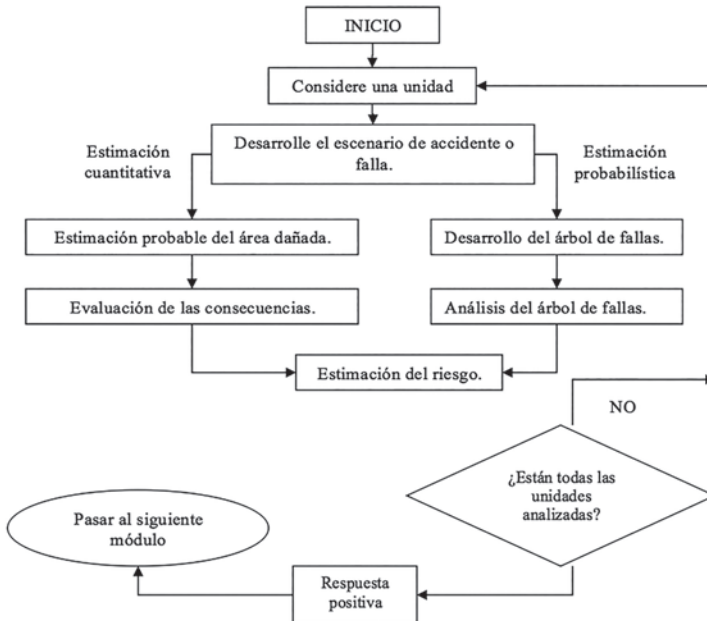


Figura 118. Diagrama de flujo para la Evaluación del Riesgo. Tomado de [69]

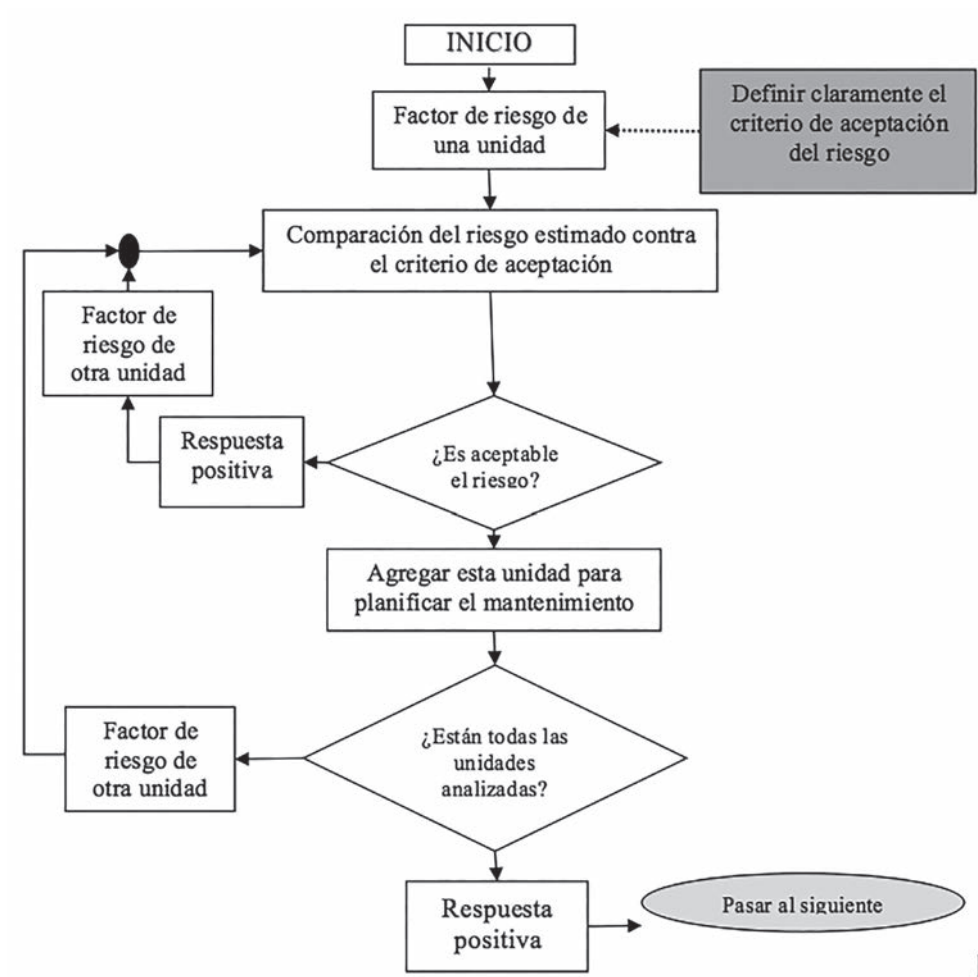
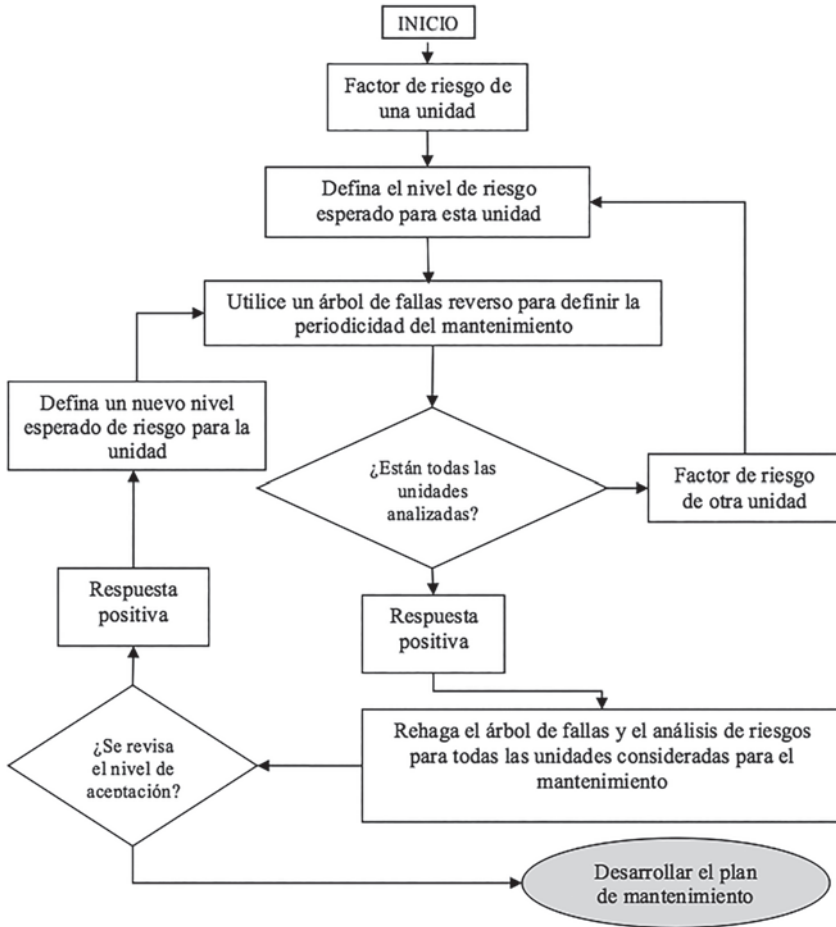


Figura 119. Diagrama de flujo para la Planeación del Mantenimiento
Tomado de [69]

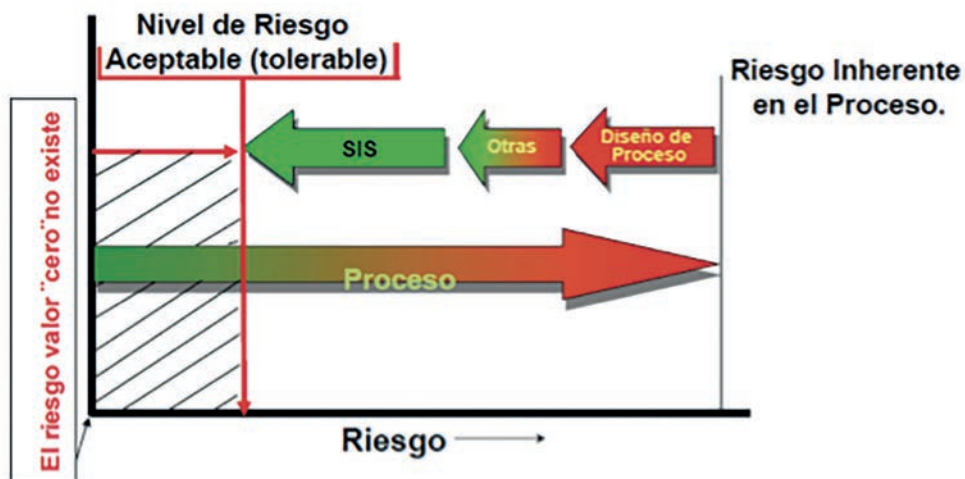


Los resultados parciales de la metodología propuesta en las Figuras 118, 119 y 120 se pueden condensar en lo mostrado por la Figura 121. Allí, y con el conocimiento del proceso se llega a definir el *Riesgo inherente al proceso*. Posteriormente, y habiendo definido el *Nivel de Riesgo aceptable o tolerable* (de acuerdo a Normas y Estándares), se procede a rediseñar el proceso y a aplicar otras medidas de forma tal que el Riesgo se reduce; no obstante la reducción del Riesgo, aún está alejado del *Nivel de riesgo aceptable*, entonces hacen su aparición los *Sistemas Integrados de Seguridad SIS*,

con el objetivo garantizar que el Riesgo se lleve a niveles aceptables o tolerables (Recordar que el Riesgo no se puede llevar a un valor 0).

Figura 120. Esquema de ¿Cómo reducir el Riesgo a un nivel aceptable?

Tomado de [70]



Ahora bien, con base en la definición de *SIL* dada en 9.3, éste posee cuatro valores estandarizados, de 1 a 4, siendo *SIL 1* el de mayor probabilidad de falla u ocurrencia y por ende el de menor Factor de reducción de riesgo, y por el contrario el *SIL 4* el de menor probabilidad de falla u ocurrencia y consecuentemente el de mayor Factor de reducción de riesgo (Tabla 32).

Tabla 32. Valores estandarizados de SIL y características asociadas. Tomado de [70]

Nivel de integridad en seguridad	Probabilidad de falla por año en demanda (modo de demanda en operación)	Factor de Reducción de Riesgo
SIL 4	$\geq 10^{-5}$ hasta $< 10^{-4}$	100 000 hasta 10 000
SIL 3	$\geq 10^{-4}$ hasta $< 10^{-3}$	10 000 hasta 1 000
SIL 2	$\geq 10^{-3}$ hasta $< 10^{-2}$	1 000 hasta 100
SIL 1	$\geq 10^{-2}$ hasta $< 10^{-1}$	100 hasta 10

La Figura 122 muestra por un lado que el *Factor de reducción de riesgo* es el inverso de la *Probabilidad de Falla en demanda*, y por otro lado presenta las equivalencias de niveles SIL en varios Estándares. Obsérvese en particular el estándar IEC 61508.

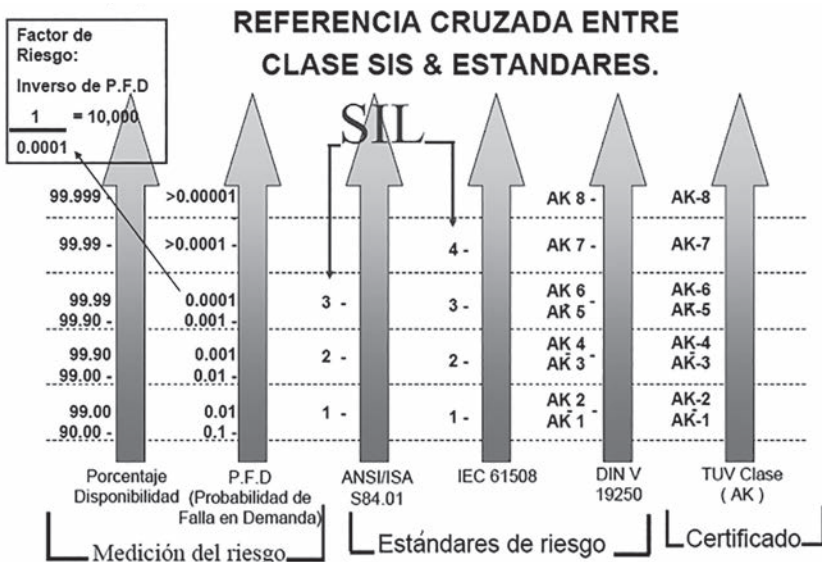
Contémplesse esta situación: Se dispone de un sistema **SIL 3**, cuya disponibilidad mínima es del 99,90% (Figura 140 para IEC 61508), o en otras palabras, la probabilidad de fallar es del 0,01% o de 0,0001. Como una primera impresión, podría pensarse que esa confiabilidad es “sumamente bueno” ... Para juzgar esta impresión no hay valoraciones absolutas, todo depende de qué contexto se esté analizando. Un sistema real, que posea un **SIL 3**, y a modo de ejemplo, podría verse reflejado en las dos situaciones descritas a continuación:

Situación 1. Un Sistema con **SIL 3** al fallar podría permitir que el sistema de agua potable de la Ciudad de México se contaminara por el lapso de 1 hora/mes.

Situación 2. Un Sistema con **SIL 3** controlando los aterrizajes del aeropuerto internacional de la Ciudad de México, podría llevar a la ocurrencia de dos aterrizajes inseguros/día.

¿A cuál de los dos escenarios le gustaría que estuvieran expuestos su familia y Usted? Probablemente su respuesta sea *al primero*, pero con seguridad que no tiene idea del dolor causado por una disentería o por padecer el ataque del ébola...

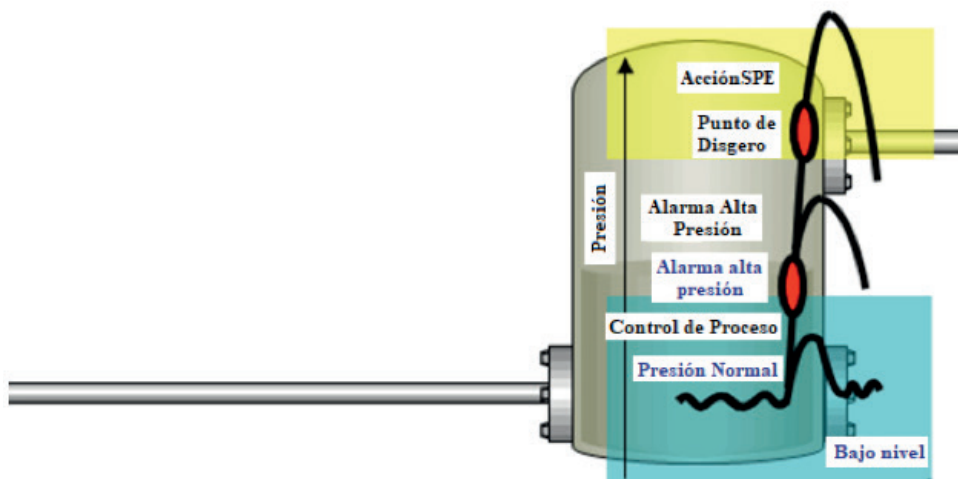
Figura 121. Equivalencias del SIL en varios estándares Tomado de [70]



7.5. Explicación de la actuación de un SIS

Como se definió en 7.3, un *SIS* es un sistema independiente o externo a una planta o proceso, con el fin de garantizar que el riesgo no sobrepase cierto *SIL*, si determinadas condiciones son violadas. Podría entenderse un *SIS* como un sistema de seguridad *redundante* en una planta que ya posee ciertas alarmas y dispositivos de seguridad. La Figura 123 presenta un recipiente a presión alimentado por una tubería, en el cual se desea garantizar que la presión en su interior no supere un determinado monto llamado *presión normal*. En el evento que la presión supere la *presión normal* deberá actuar una alarma de *alta presión*, y si en el caso que la presión sobrepase el valor de alta presión, entonces deberá actuar un *sistema de paro de emergencia SPE* y detener el sistema, para evitar la ocurrencia de un evento catastrófico.

Figura 122. Planta de proceso a controlar. Tomado de [70]



El sistema que posibilitará la operación básica de control del sistema de interés obedece a la arquitectura de un sistema de control realimentado o *feedback* (Figura 124).

La Figura 125 presenta el esquema del sistema de control *feedback*, propuesto para el sistema real de la Figura 123, y basado en el esquema de la Figura 124.

Figura 123. Esquema general sistema de Control realimentado o *feedback*
Tomado de [71]

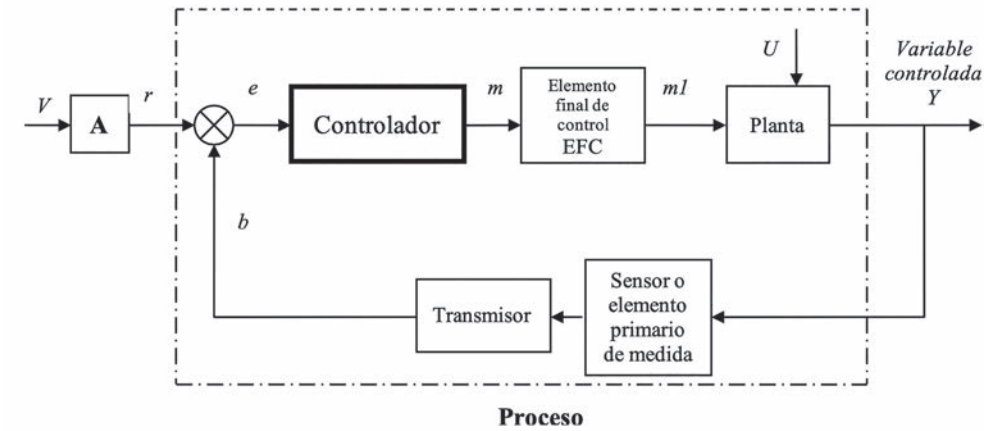
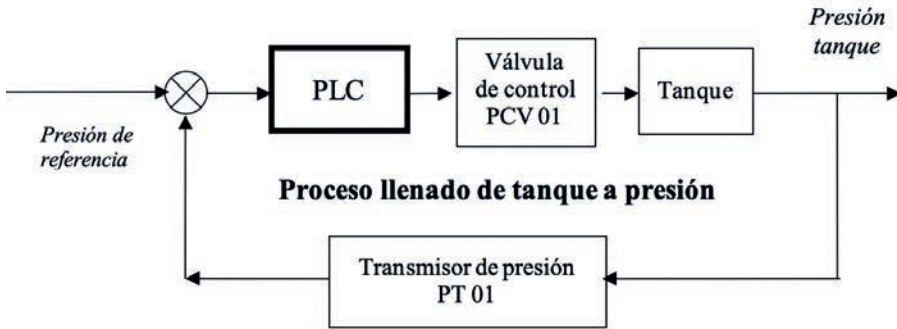
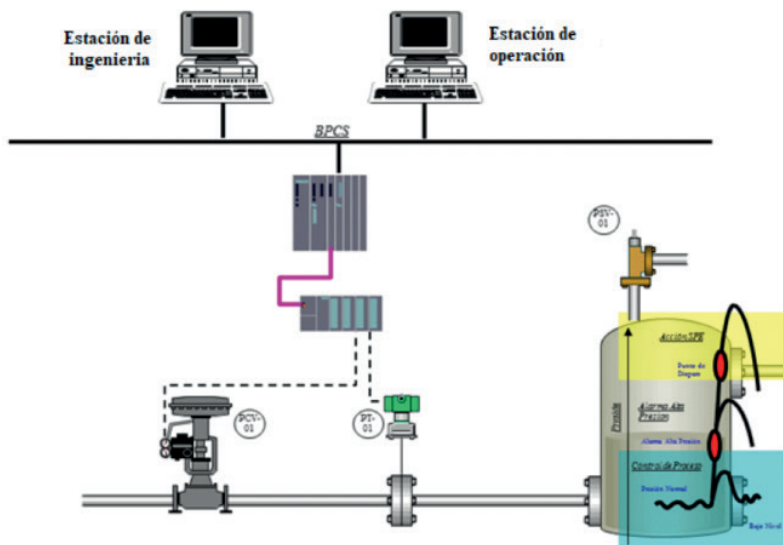


Figura 124. Sistema de control *feedback* para el tanque de la Figura 123



En la Figura 126 se presenta la materialización del sistema de control previsto en la Figura 125. La simbología utilizada corresponde a la Norma ISA S5.1 de la *Instrument Society of America ISA*. Obsérvese que se ha instalado la válvula de seguridad PSV 01, la cual no pertenece al lazo de control, pero deberá cumplir la función ¿what if? Obsérvese también que el lazo de control se ha montado adicionalmente en un control supervisor *SPC*, con el objeto de supervisar a distancia, cambiar parámetros del proceso o detenerlo a voluntad.

Figura 125. Sistema de control *feedback* real para el tanque de la Figura 85
Tomado de [70]



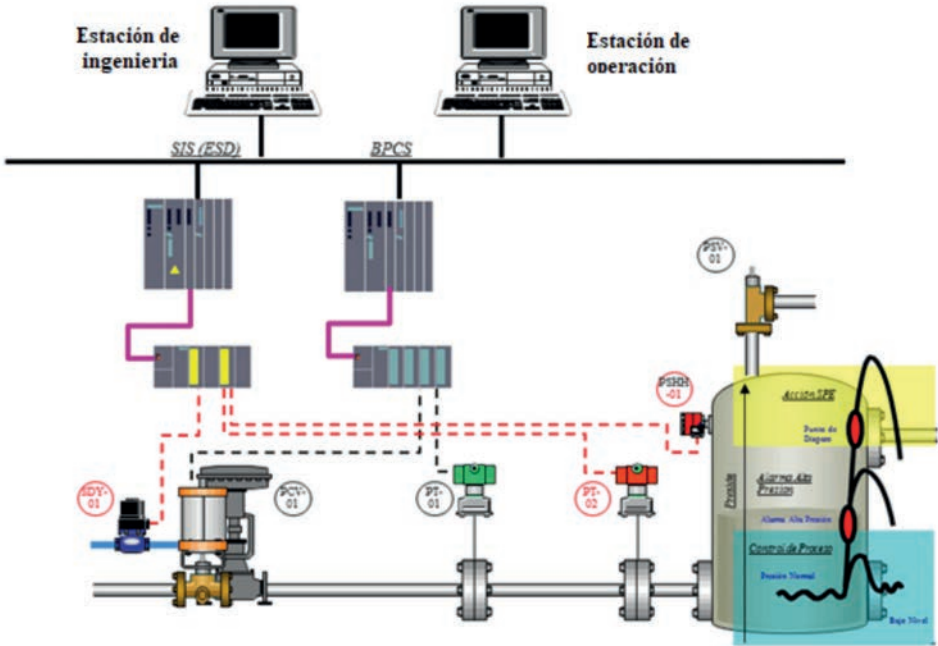
No debe pensarse en ningún momento que el sistema mostrado en la Figura 126 es 100% seguro, puesto que ninguno de sus componentes posee una confiabilidad del 100%, y mucho menos su combinación. Por ejemplo, si se quisiera conocer la confiabilidad de la válvula PSV 01, se debería consultar su manual o por defecto el fabricante (si es responsable) debería proveer esta información, y se debería hacer lo propio con el transmisor, la válvula de control, PLC, etc. Conociendo la información anterior y aplicando herramientas de la Teoría de confiabilidad se podría conocer la probabilidad de falla del sistema.

Ahora bien, hasta este momento no ha aparecido el aporte sistémico del RBM. En la Figura 127 se presentan los componentes del SIS:

- Un PLC adicional, exclusivamente dedicado al SIS.
- Una válvula solenoide SDY 01, para forzar en una situación extrema a la PCV 01 a cerrarse.
- Un transmisor de presión PT 02, montado sobre la tubería de entrada al tanque.
- Un interruptor de presión accionado por sobrepresión PSHH 01, ubicado al interior del tanque.

- Líneas electrónicas independientes a las inicialmente disponibles (color rojo).

Figura 126. Planta de proceso protegida por un SIS Tomado de [70]

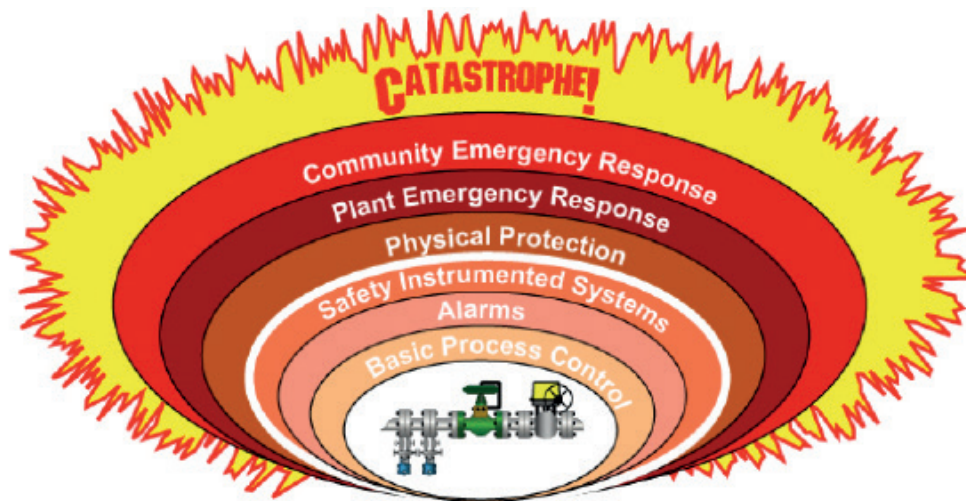


Como se puede apreciar la arquitectura del SIS es completamente independiente a la del lazo de control inicial, y dependiendo de la calidad y características de sus componentes debe minimizar la ocurrencia de una emergencia, elevando el SIL a un valor previsto para la planta en particular.

Por último, en este panorama sobre RBM (ver Figura 128), si falla el SIS, la planta deberá poseer unas protecciones físicas adicionales, el personal de planta deberá haber sido entrenado para responder a una emergencia, se debería recibir ayuda de la comunidad de emergencia externa a la planta, y si aún no es suficiente, entonces inevitablemente sobrevendrá la catástrofe, pero el camino será largo...

Figura 127. N Niveles de protección antes que ocurra la catástrofe

Tomado de [70]



7.6. Algunas normas y estándares relacionados con prevención y manejo del riesgo

- HSE – PES. Programmable Electronic Systems in safety related applications, Parts 1 & 2, U.K. Health & Safety Executive. 1987.
- AIChE – CCPS. *Guidelines for Safe Automation of Chemical Process*. Center for Chemical Process Safety by The American Institute of Chemical Engineers. 1993.
- IEC 61508. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. 1998. (BS EN 61508:2002).
- IEC 61511. Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector. 2003. (BS EN 61511:2003).
- ANSI/ISA-84.00.01-2004 (IEC 61511 Mod). Functional safety: Safety instrumented systems for the process industry sector. 2004.
- NFPA 85. *Boiler and Combustion Systems Hazard Code*. National Fire Protection Association. 2004.
- API RP 556. *Recommended Practice for instrumentation and control for fired*

heaters and steam generators. American Petroleum Institute. 1997.

- OSHAS. 29 CFR 1910.119 – Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals.

7.7. Estudio para determinar madurez de las empresas del área metropolitana en cuanto a RBM

En el año 2018 desde la Universidad Tecnológica de Pereira se condujo un estudio tendiente a determinar la madurez de las empresas del área metropolitana Pereira-Dosquebradas, con miras a una futura implementación de RBM.

A continuación, se presenta la encuesta que fue diseñada con el objetivo de conocer el estado de la función mantenimiento preventivo, la atención a la salud ocupacional y el manejo de riesgos en una empresa.

ENCUESTA 2018 PARA DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO



La encuesta que se presenta a continuación tiene por objetivo diagnosticar el estado de la función Mantenimiento en su empresa. De la veracidad de sus respuestas depende la obtención de resultados confiables.

II. DATOS GENERALES:

Fecha: _____ Encuesta N°: _____

Nombre de la empresa: _____

NIT: _____

Actividad económica: _____

Nombre del encuestado: _____

Cargo que ocupa: _____

III. DATOS DE MANTENIMIENTO:

1. ¿La encuesta aplica para toda la empresa o para un área en particular?

Toda la empresa

Área ¿Cuál? _____

2. ¿Cuáles son los niveles de automatización de las máquinas de su empresa (pueden ser varias opciones)?

Accionamiento mecánico (manual)

Accionamiento electromecánico

(motores eléctricos + transmisiones convencionales)

Automatismos neumáticos o electroneumáticos (sin PLC o controladores)

Automatismos hidráulicos o electrohidráulicos (sin PLC o controladores)

Automatizaciones con controladores o PLC, dirigiendo diversos accionamientos

Plantas o áreas automatizadas y controladas desde un PC (mímico)

3. ¿Qué tipos de Mantenimiento practica su empresa y en **cuánto porcentaje aproximado?**

Correctivo % _____

Preventivo % _____

Predictivo % _____

TPM % _____

RCM % _____

MBR % _____

Otro ¿Cuál? _____ % _____

4. ¿Existe un inventario general de las máquinas?

Sí No

5. ¿Cada máquina posee su correspondiente tarjeta maestra de datos?
Sí No
6. ¿Cada máquina posee su correspondiente hoja de vida?
Sí No
7. ¿Emiten, retroalimentan y cierran las Órdenes de Trabajo?
Sí No
8. ¿Tienen documentados los procedimientos de ejecución del mantenimiento (Instructivos)?
Sí No
9. ¿Los instructivos de trabajo contienen la siguiente información?
Código Material Necesario Herramientas
Procedimiento Tiempo estimado de ejecución
10. ¿Existen cronogramas para la programación del plan de mantenimiento preventivo?
Sí No
11. ¿En cuánto porcentaje se cumplen con los tiempos establecidos en los cronogramas? _____%
12. Del siguiente listado de inconvenientes ¿Con cuáles se enfrenta cuando regularmente aplica mantenimiento en su empresa (o área)? Valore su recurrencia, siendo 1 baja, 2 media y 3 alta.
- Falta de disponibilidad de los equipos
- Falta de planeación de las tareas
- Inconvenientes al momento de ejecutar la tarea
(Insumos, repuestos, personal)
- Cooperación con Producción u otros departamentos

Presupuesto limitado

Falta de capacitación

Falta de información sobre los equipos

Otros ¿Cuál? _____

13. ¿Cuáles índices de mantenimiento manejan? (señale con una X)

Efectividad

Rendimiento

Costos

Seguridad

14. ¿En cuanto a efectividad cuál de estos indicadores manejan?

Tiempo promedio para reparar (TPPR)

Disponibilidad Operacional

Utilización

Confiabilidad

¿Otros?

15. ¿En el área de Recursos humanos (Rendimiento) cuáles de estos indicadores manejan?

Índice de Ausentismo

Índice de Sobre-tiempo

Índice de Fuerza Hombre Contratada

Cumplimiento plan de adiestramiento

Índice de personal adiestrado

¿Otros?

16. ¿En el área de Costos cuáles de estos indicadores manejan?

Costo de mantenimiento por unidad producida

Índice costo de mantenimiento correctivo

Índice costo de mantenimiento preventivo

Relación de costo mantenimiento Vs Producción

¿Otros?

17. ¿En el área de Seguridad cuáles de estos indicadores manejan?

Índice de frecuencia bruta

Índice de frecuencia neta

Índice de severidad

¿Otros?

18. ¿Usan software de Mantenimiento?

Sí No

¿Cuál? _____

19. Dentro del software de Mantenimiento, ¿Qué información manejan?

Hoja de vida Instructivos Órdenes de trabajo
 Cronogramas Indicadores Otros

20. ¿Le gustaría recibir información en mayor profundidad acerca del Mantenimiento Basado en el Riesgo MBR?

Sí No

IV. RESIDUOS Y RIESGOS

21. ¿Tienen diseñado e implementado un programa RESPEL?

Sí No

22. De acuerdo a su programa RESPEL (en ausencia de programa RESPEL, entonces basarse en el manejo que le den a los residuos peligrosos)

¿Qué residuos peligrosos manejan?

¿Poseen una estadística de generación de residuos peligrosos producidos por mes?

Sí No

¿Disponen de un espacio de almacenamiento temporal de productos peligrosos?

Sí No

¿Qué empresa les presta el servicio de recolección de productos peligrosos (En caso de no ser confidencial la información)?

23. ¿Tienen implementado un plan de salud ocupacional?

Sí No

24. ¿Cuenta el plan de salud ocupacional con los siguientes ítems?

Coordinador de salud ocupacional (SISO)

Brigada de emergencias

COPASST

Comité convivencia laboral COCOLA

Subprograma de Higiene y Seguridad industrial

Otros

25. ¿Cuáles elementos de protección personal EPP Industrial utilizan?

Monogafas Casco Caretas Guantes

Fajas Cinturón de seguridad Traje para soldar

Tapa oídos Arnés de seguridad Calzado de seguridad

Otros ¿Cuáles? _____

26. ¿Sabe o conoce de la existencia de algún tipo de metodología, herramienta computacional o algoritmo que, de acuerdo a ciertos eventos, establezca una predicción de accidente en una instalación peligrosa?

Sí No ¿Cuál? _____

27. ¿Aplica su empresa una alguna de las posibilidades descritas en la pregunta 25?

Sí No ¿Cuál? _____

Gracias por su disposición y atención.

En las Figuras 129 y 130 se pueden apreciar los resultados del procesamiento de la información de la pregunta 3 de la encuesta. Como puede apreciarse, y de manera similar a lo obtenido 12 años atrás, en 2007 (numeral 3.4), el sistema de mantenimiento más ampliamente utilizado sigue siendo el preventivo.

Figura 128. Sistema de mantenimiento empleados por las grandes empresas Pereira - Dosquebradas, al año 2018 Tomado de [3]

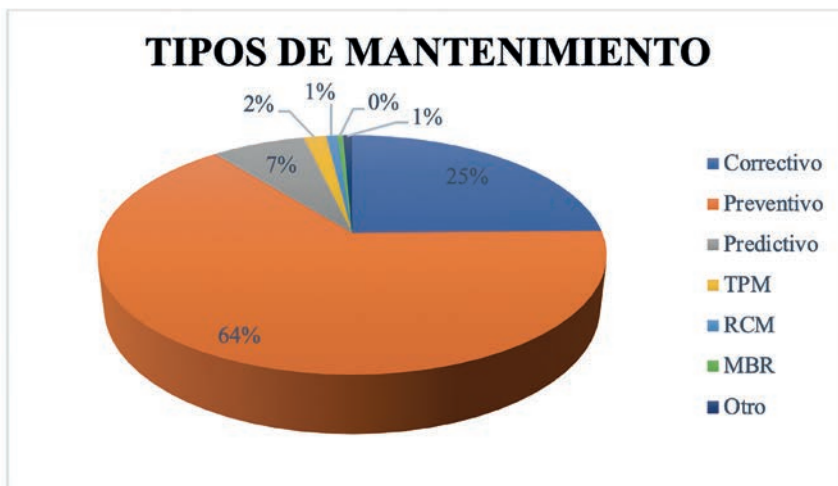
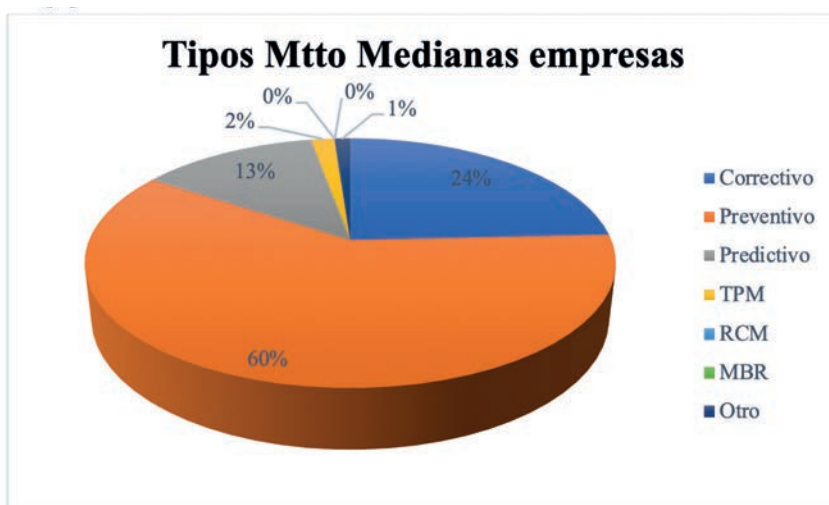


Figura 129. Sistema de mantenimiento empleados por las grandes empresas Pereira - Dosquebradas, al año 2018 Tomado de [3]



El estudio mostró que, a pesar de tratarse de grandes y medianas empresas, presentan falencias grandes en cuanto a:

- Diligenciamiento de hojas de vida, instructivos de mantenimiento y gestión de las órdenes de trabajo.
- Hay problemas de coordinación de los departamentos de mantenimiento con otras áreas de la compañía, originando inconvenientes para ejecución de los planes particulares de mantenimiento.
- Los indicadores más utilizados son los de Efectividad del mantenimiento, y en menor medida los de Rendimiento y Costos también son evaluados.
- Hay bajo uso de los indicadores de seguridad
- Un porcentaje considerable de las empresas estudiadas, utilizan software de mantenimiento, el cual en gran parte es utilizado para el seguimiento de la hoja de vida de cada equipo que estas empresas poseen; no se nota gran uso del software para la gestión de las órdenes de trabajo y de los cronogramas
- Las empresas manifestaron el interés por recibir información en mayor profundidad acerca del Mantenimiento Basado en el Riesgo.
- Curiosamente, las medianas empresas estudiadas serían aptas para aplicar MBR, mientras que un porcentaje representativo de las grandes empresas no estarían aptas para aplicar RBM

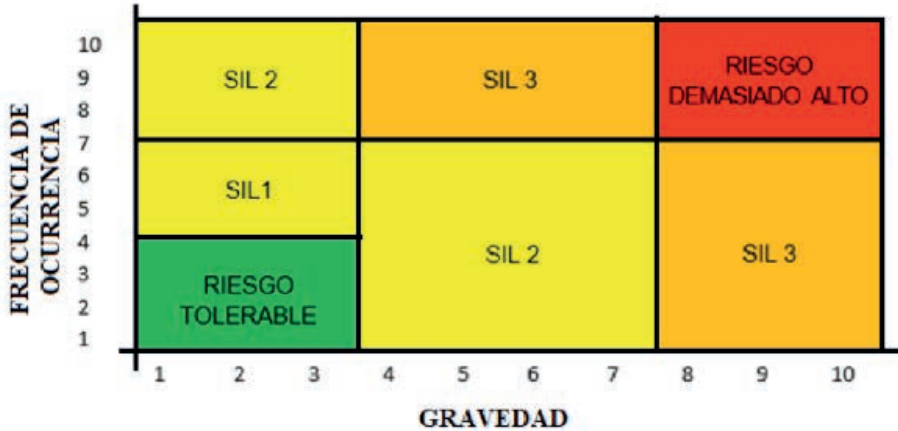
De manera complementaria a la metodología descrita en el numeral 7.4, a continuación, se presente un fragmento de una metodología simplificada para la evaluación del peligro, aplicada a un horno industrial de una empresa de la ciudad. En la tabla 33 se presenta el análisis de riesgo, modo y efecto de falla para el subsistema de instrumentación del horno, y en la Figura 131 se muestra la determinación gráfica de la evaluación del peligro. Los puntos negros de la Figura 131 resultan de graficar la gravedad y la frecuencia para cada uno de los modos de falla descritos en la tabla 33.

Tabla 33 *Análisis de riesgos, modos y efectos de falla*

Tomado de [3]

		Fecha:			
Sistema: Instrumentación y control		Preparado por:			
Equipo: Control de la caldera		Aprobado por:			
Función: Controlar y medir variables del proceso					
Modo de falla	Causa	Consecuencia	Gravedad	Frecuencia	Riesgo
Tensiones nulos o insuficientes en los terminales	a) Interruptores desconectados b) Fusibles quemados c) Conductores rotos d) Alambros incorrectos	Paro de producción	6	3	18
Error en la medición de la temperatura del horno	a) Deterioro de los sensores b) Deterioro del cableado eléctrico	Paro de producción, incendio y/o explosión	8	4	32
Medición incorrecta del flujo de aire del quemador	a) Deterioro del medidor de flujo b) Presión insuficiente en los ductos	Paro de producción, incendio y/o explosión	8	2	16
Medición en la entrada de combustible falla	a) Piloto inundado b) Ajuste incorrecto del quemador c) No hay combustible en la línea principal	Paro de producción, incendio y/o explosión	8	5	40

Figura 130. Evaluación del riesgo para el sistema de instrumentación y control de la tabla 31 Tomado de [3]



7.8. Tema de consulta y reflexión

Se recomienda al lector consultar, analizar y reflexionar alrededor de las siguientes preguntas:

- Si una planta no está altamente instrumentada y no posee sistemas SIS ¿Entonces no es posible paliar el riesgo?
- **¿Qué es un programa RESPEL?**
- **¿Para qué sirve un programa RESPEL en una empresa?**
- Consulte algunos ejemplos de RESPEL comunes
- **¿Qué pasa con un producto RESPEL mal manejado?**
- ¿Qué es un COPASST?
- **¿Quiénes integran un COPASST y cuáles son sus funciones principales?**
- **¿Cómo pueden interactuar el COPASST y el RESPEL para reducir el riesgo en las instalaciones de una Planta?**

CAPÍTULO OCHO

Salud ocupacional y Seguridad Industrial

Teniendo en cuenta las cada vez más elevadas exigencias en cuanto a la protección del trabajador en su sitio de trabajo, con el presente capítulo se pretende brindar al Ingeniero/Tecnólogo de mantenimiento, un panorama rápido y general de la seguridad y salud en el trabajo, en estrecha relación con el objetivo 4 del mantenimiento (numeral 1.3.4.). Es conveniente recordar que el Código Sustantivo del Trabajo C.S.T. indica la responsabilidad del empleador (o quien lo represente) sobre la seguridad y salud ocupacional de sus empleados.

8.1. Definiciones generales

Accidente de trabajo: Todo suceso imprevisto y repentino que sobrevenga por causa u ocasión del trabajo y que produzca al trabajador lesión orgánica o perturbación funcional permanente o pasajera, y que no haya sido provocado deliberadamente o por culpa grave de la víctima (Código sustantivo del trabajo C. S. T.).

Es también accidente de trabajo aquel que se produce durante la ejecución de órdenes del empleador o durante la ejecución de una labor bajo su autoridad, aún fuera del lugar y horas de trabajo.

El incidente es aquella situación en la cual no hay lesión, pero el trabajador estuvo a punto de sufrir un accidente. En el incidente no hay lesión, “es el casi”; haciendo un silogismo, un incidente es a una falla potencial como un accidente es a una falla funcional. Los incidentes que no se reportan o que no se analizan ni se les presta la debida atención, luego, pueden convertirse en accidentes / tragedias.

La Resolución 1401 de 2007 del Ministerio de la Protección Social reglamenta la investigación de incidentes y accidentes de trabajo

Enfermedad laboral (Ocupacional): Todo estado patológico que sobrevenga como consecuencia obligada de la clase de trabajo que desempeña el trabajador o del medio en que se ha visto obligado a trabajar, bien sea determinado por agentes físicos, químicos ó biológicos (C. S. T.). Ejemplos: sordera profesional, enfermedades por vibración, asbestosis, catarata profesional, cáncer ocupacional, etc.

Acto inseguro: “Son las fallas, olvidos, errores u omisiones que cometen las personas al realizar un trabajo, tarea o actividad y que pudieran ponerlas en riesgo

de sufrir un accidente”. **Según algunas estadísticas, los actos inseguros ocasionan el 96% de los accidentes.**

Algunos ejemplos de actos inseguros:

- Trabajar sin equipo de protección personal
- Cruzar la calle sin precaución (generación *unplugged*)
- Conectar un número interminable de aparatos electrónicos a un multi-toma
- Lanzar objetos a los compañeros
- Pasarse un Pare/hablar por teléfono cuando vamos manejando/no utilizar el cinturón de seguridad.
- Derramar materiales/aceites en el piso -y no limpiar-
- Jugar o hacer bromas durante actividades -laborales-
- Falta de Prevención en general

Condiciones inseguras:

“Son las instalaciones, equipos de trabajo, maquinaria y herramientas que NO están en condiciones de ser usados y de realizar el trabajo para el cual fueron diseñadas o creadas y que ponen en riesgo de sufrir un accidente a la o las personas que las ocupan”.

Algunos ejemplos de condiciones inseguras:

- Suciedad y desorden en el área de trabajo
- Cables energizados en mal estado (expuestos, rotos, pelados, sueltos)
- Pasillos, escaleras y puertas obstruidas
- Pisos en malas condiciones
- Escaleras sin pasamanos
- Mala ventilación
- Herramientas sin guardas de protección

- Maquinaria sin anclaje adecuado o sin paros de emergencia

Durante la jornada de trabajo el trabajador se encuentra sometido a **condiciones inseguras** en el sitio de trabajo, debidas a:

- Edificaciones (ubicación, dependencias, pisos, zonas elevadas, puertas, otros).
- Máquinas, equipos y herramientas.
- Instalaciones, operaciones y procesos industriales.

Y adicionalmente, el trabajador o sus compañeros pueden cometer **actos inseguros**.

8.2. Salud Ocupacional S. O.

Conjunto de medidas o acciones dirigidas a preservar, mejorar y reparar la salud de las personas en su vida de trabajo, individual y colectivamente. La S. O. en una actividad multidisciplinaria y recibe aportes de la Medicina, Ciencias biológicas, Física, Química, Ingeniería, Arquitectura, Economía, Administración, Psicología Industrial, Derecho del Trabajo y Seguridad Social.

¿Qué hace la S. O. para prevenir accidentes y enfermedades ocupacionales?

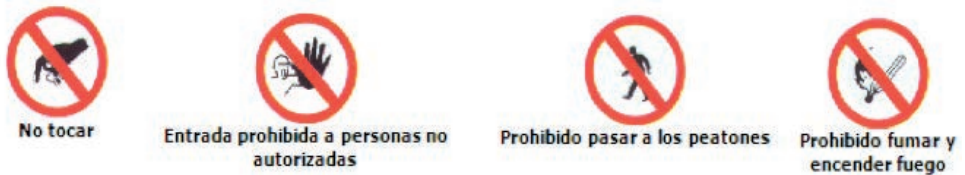
- Respecto de las edificaciones. Define ubicación, dependencias, pisos, zonas elevadas, puertas, etc. Apoya y valida el diseño, construcción, señalización, con base a Normas.
- Respecto de las Máquinas, equipos y herramientas. Apoya y valida el Diseño (funcional, ergonómico, seguro), soporta los procesos productivos; todo lo anterior con base a Normas.
- Instalaciones, operaciones y procesos industriales.
- Sensibilización y capacitación del trabajador.

Una labor adicional de la Salud ocupacional es la de **Señalización**, la cual se apoya en Normas y Códigos de colores, por ejemplo: Ministerio de Trabajo y seguridad social, Resolución número 2400, título V, de los colores de seguridad, capítulo I; ICONTEC, NTC 1461,1462, tamaño, forma y colores de las señales de seguridad. En

la señalización se manejan cuatro colores básicos: Rojo, Amarillo, Verde y Azul, cada uno de los cuales tiene su significado y su campo de acción.

- **Rojo (Figura 132).** El color rojo denota parada o prohibición e identifica además los elementos contraincendios. Se usa para indicar dispositivos de *parada de emergencia* o dispositivos relacionados con la seguridad cuyo uso está prohibido en circunstancias normales, como por ejemplo paros de emergencia.

Figura 131. Algunos ejemplos de señalizaciones de parada y prohibición



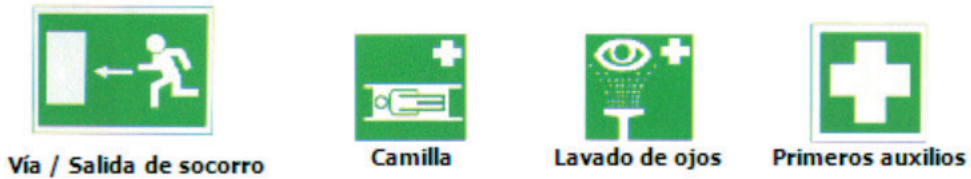
- **Amarillo (Figura 133).** El color amarillo es un color preventivo, y se usará solo o combinado con bandas de color negro, de igual ancho, inclinadas 45° respecto de la horizontal para indicar precaución o advertir en: partes de máquinas o edificaciones que puedan golpear, cortar, electrocutar, etc.

Figura 132. Algunos ejemplos de señalizaciones de prevención



- **Verde (Figura 133).** El color verde denota condición segura. Se usa en elementos de seguridad general, excepto incendio, por ejemplo, en: Puertas de acceso a salas de primeros auxilios, Puertas o salidas de emergencia, Botiquines, armarios con elementos de seguridad, etc.

Figura 133. Algunos ejemplos de señalización de condición segura



- **Azul (Figura 135).** El color Azul denota Obligación. Se aplica sobre aquellas partes de artefactos cuya remoción o accionamiento implique la obligación de proceder con precaución, por ejemplo: tapas de tableros eléctricos, tapas de cajas de engranajes, cajas de comando de aparatos y máquinas, utilización de equipos de protección personal, etc.

Figura 134. Algunos ejemplos de señalización de obligación



A manera de ejemplo particular, en la Figura 136, se presenta un cuadro resumen sobre riesgos diversos a que se expone una persona al hacer uso del centro de mecanizado Haas VF 2 de la Universidad Tecnológica de Pereira. Claramente se pueden apreciar los colores **Amarillo**, **Rojo** y **Azul**, con sus respectivas interpretaciones.

Otra labor adicional de la S.O. es indicar las capacitaciones exigidas por la legislación colombiana que deben ser cumplidas.

La resolución 1409 de 2012 del ministerio de Trabajo de Colombia [67], establece el “Reglamento de Seguridad para protección contra caídas en trabajo en alturas”, para trabajos rutinarios u ocasionales, entendiéndose como altura aquella ubicación en la cual el operador supere 1,5 m sobre el nivel del piso (altura positiva) o por debajo de él (altura negativa). La resolución 1409 ha sido modificada por la Resolución 1903 de 2013 y la Resolución 3368 de 2014. La resolución aplica a todos los empleadores, empresas, contratistas, subcontratistas y trabajadores de todas las actividades económicas de los sectores formales e informales de la economía, que desarrollen trabajo en alturas con peligro de caídas

Figura 135. Riesgos al hacer uso de un centro de mecanizado Haas VF-2
Tomado de [3]



Algunas acciones que se deben ejecutar antes, durante y después de ejecutar tareas de mantenimiento

De manera resumida, y dependiendo del tipo de trabajo (con acceso por cuerdas, con suspensión o no), la resolución 1409 [72] indica la necesidad de utilizar los siguientes elementos:

- **Absorbedor de choque:** Equipo cuya función es disminuir las fuerzas de impacto en el cuerpo del trabajador o en los puntos de anclaje en el momento de una caída.
- **Anclaje:** Punto seguro al que pueden conectarse equipos personales de protección contra caídas con resistencia certificada a la rotura y un factor de seguridad, diseñados y certificados en su instalación por un fabricante y/o una persona calificada. Puede ser fijo o móvil según la necesidad.
- **Arnés de cuerpo completo:** Equipo de protección personal diseñado para distribuir en varias partes del cuerpo el impacto generado durante una caída. Es fabricado en correas cosidas y debidamente aseguradas, e incluye elementos para conectar equipos y asegurarse a un punto de anclaje. Debe ser certificado bajo un estándar nacional o internacionalmente aceptado.
- **Baranda:** Barrera que se instala al borde de un lugar para prevenir la posibilidad de caída. Debe garantizar una capacidad de carga y contar con un travesaño de agarre superior, una barrera colocada a nivel del suelo para evitar la caída de objetos y un travesaño intermedio o barrera intermedia que prevenga el paso de personas entre el travesaño superior y la barrera inferior.
- **Eslinga de protección contra caídas:** Sistema de cuerda, reata, cable u otros materiales que permiten la unión al arnés del trabajador al punto de anclaje. Su función es detener la caída de una persona, absorbiendo la energía de la caída de modo que la máxima carga sobre el trabajador sea de 900 libras. Su longitud total, antes de la activación, debe ser máximo de 1,8 m.
- **Eslinga de posicionamiento:** Elemento de cuerda, cintas, cable u otros materiales con resistencia mínima de 5 000 libras (22,2 kN – 2 272 kg) que puede tener en sus extremos ganchos o conectores que permiten la unión al arnés del trabajador y al punto de anclaje, y que limita la distancia de caída del trabajador a máximo 60 cm. Su función es ubicar al trabajador en un sitio de trabajo, permitiéndole utilizar las dos manos para su labor.
- **Eslinga de restricción:** Elemento de cuerda, reata, cable u otro material con resistencia mínima de 5 000 libras (22,2 kN – 2 272 kg) y de diferentes longitudes o graduable que permita la conexión de sistemas de bloqueo o freno. Su función es limitar los desplazamientos del trabajador para que no llegue a un sitio del que pueda caer.
- **Gancho:** Equipo metálico con resistencia mínima de 5000 libras (22,2 kN –

2272 kg) que es parte integral de los conectores y permite realizar conexiones entre el arnés y los puntos de anclaje, sus dimensiones varían de acuerdo a su uso, los ganchos están provistos de una argolla u ojo al que está asegurado el material del equipo conector (cuerda, reata, cable, cadena, entre otros) y un sistema de apertura y cierre con doble sistema de accionamiento para evitar una apertura accidental, que asegure que el gancho no se salga de su punto de conexión.

- **Líneas de vida horizontales:** Sistemas certificados de cables de acero, cuerdas, rieles u otros materiales que debidamente ancladas a la estructura donde se realizará el trabajo en alturas, permitan la conexión de los equipos personales de protección contra caídas y el desplazamiento horizontal del trabajador sobre una determinada superficie; la estructura de anclaje debe ser evaluada con métodos de ingeniería.
- **Líneas de vida horizontales fijas:** Son aquellas que se encuentran debidamente ancladas a una determinada estructura, fabricadas en cable de acero o rieles metálicos y según su longitud, se soportan por puntos de anclaje intermedios; deben ser diseñadas e instaladas por una persona calificada. Los cálculos estructurales determinarán si se requiere de sistemas absorbentes de energía.
- **Líneas de vida horizontales portátiles:** Son equipos certificados y pre-ensamblados, elaborados en cuerda o cable de acero, con sistemas absorbentes de choque, conectores en sus extremos, un sistema tensionador y dos bandas de anclaje tipo *Tie Off*; estas se instalarán por parte de los trabajadores autorizados entre dos puntos de comprobada resistencia y se verificará su instalación por parte del coordinador de trabajo en alturas o de una persona calificada.
- **Líneas de vida verticales:** Sistemas certificados de cables de acero, cuerdas, rieles u otros materiales que debidamente ancladas en un punto superior a la zona de labor, protegen al trabajador en su desplazamiento vertical (ascenso/descenso). Serán diseñadas por una persona calificada, y deben ser instaladas por una persona calificada o por una persona avalada por el fabricante o por la persona calificada.
- **Mosquetón:** Equipo metálico en forma de argolla que permite realizar conexiones directas del arnés a los puntos de anclaje. Otro uso es servir de conexión entre equipos de protección contra caídas o rescate a su punto de anclaje.

- **Rodapié:** Elemento de protección colectiva que fundamentalmente previene la caída de objetos o que, ante el resbalón de una persona, evita que esta caiga al vacío. Debe ser parte de las barandas y proteger el área de trabajo a su alrededor.

Adicionalmente, la resolución 1409 [72] indica la obligatoriedad de poseer los siguientes documentos y/o adelantar los siguientes procedimientos:

- **Aprobación de equipos:** Documento escrito y firmado por una persona calificada, emitiendo su concepto de cumplimiento con los requerimientos del fabricante.
- **Certificación de equipos:** Documento que certifica que un determinado elemento cumple con las exigencias de calidad de un estándar nacional que lo regula y en su ausencia, de un estándar avalado internacionalmente. Este documento es emitido generalmente por el fabricante de los equipos.
- **Capacitación:** Para efectos de esta norma, es toda actividad realizada en una empresa o institución autorizada, para responder a sus necesidades, con el objetivo de preparar el talento humano mediante un proceso en el cual el participante comprende, asimila, incorpora y aplica conocimientos, habilidades, destrezas que lo hacen competente para ejercer sus labores en el puesto de trabajo. Las capacitaciones deben ser conducidas por Centro de entrenamiento (igualmente reglamentos por la resolución 1409, y las posteriores que las modifican).
- **Reentrenamiento:** Proceso anual obligatorio, por el cual se actualizan conocimientos y se entrenan habilidades y destrezas en prevención y protección contra caídas. Su contenido y duración depende de los cambios en la norma para protección contra caídas en trabajo en alturas, o del repaso de la misma y de las fallas que en su aplicación que el empleador detecte, ya sea mediante una evaluación a los trabajadores o mediante observación a los mismos por parte del coordinador de trabajo en alturas. El reentrenamiento debe realizarse anualmente o cuando el trabajador autorizado ingrese como nuevo en la empresa, o cambie de tipo de trabajo en alturas o haya cambiado las condiciones de operación o su actividad. Las empresas o los gremios en convenio con éstas, pueden efectuar el reentrenamiento directamente bajo el mecanismo de Uvae o a través de terceros autorizados por esta resolución. Debe quedar prueba del reentrenamiento, que puede ser, mediante lista de asistencia, constancia o certificado.

La resolución 1409 [72] indica también la necesidad de contar con personal capacitado (propio o por asesoría externa):

- **Trabajador autorizado:** Trabajador que posee el certificado de capacitación de trabajo seguro en alturas o el certificado de competencia laboral para trabajo seguro en alturas.
- **Ayudante de Seguridad:** Trabajador designado por el empleador para verificar las condiciones de seguridad y controlar el acceso a las áreas de riesgo de caída de objetos o personas. Debe tener una constancia de capacitación en protección contra caídas para trabajo seguro en alturas en nivel avanzado o tener certificado de competencia laboral para trabajo seguro en alturas.
- **Coordinador de trabajo en alturas:** Trabajador designado por el empleador, denominado antiguamente persona competente en la normatividad anterior, capaz de identificar peligros en el sitio en donde se realiza trabajo en alturas, relacionados con el ambiente o condiciones de trabajo y que tiene su autorización para aplicar medidas correctivas inmediatas para controlar los riesgos asociados a dichos peligros. Debe tener certificación en la norma de competencia laboral vigente para trabajo seguro en alturas, capacitación en el nivel de coordinador de trabajo en alturas y experiencia certificada mínima de un año relacionada con trabajo en alturas. Los requisitos de certificación, capacitación y experiencia del coordinador de trabajo en altura, serán exigidos a partir de los dos años siguientes a la expedición de la presente resolución, mientras que transcurre dicho tiempo deben contar como mínimo con el certificado de capacitación del nivel avanzado en trabajo en alturas o certificación de dicha competencia laboral. La designación del coordinador de trabajo en alturas no significa la creación de un nuevo cargo, ni aumento en la nómina de la empresa, esta función puede ser llevada a cabo por ejemplo por el coordinador o ejecutor del programa de salud ocupacional o cualquier otro trabajador designado por el empleador.
- **Persona calificada:** Ingeniero con experiencia certificada mínimo de dos años para calcular resistencia de materiales, diseñar, analizar, evaluar, autorizar puntos de anclaje y elaborar especificaciones de trabajos, proyectos o productos acorde con lo establecido en la presente resolución. La persona calificada es la única persona que da la autorización a un punto de anclaje sobre el cual se tengan dudas.

En ciertos casos específicos también pueden requerirse capacitaciones

para trabajos específicos, tales como trabajo en espacios confinados y para la manipulación de materiales o residuos peligrosos, entre otros.

8.2.1 Antes de la realización de trabajos

A pesar de que las siguientes actividades no son responsabilidad directa del Ingeniero/Tecnólogo de mantenimiento (a menos que sea el coordinador de trabajo en alturas), es pertinente que conozca el procedimiento previo que se debe seguir antes de la ejecución de tareas de mantenimiento.

- El coordinador de trabajo en alturas debe definir si se trata de un trabajo en alturas o no (aplicando los lineamientos de la Resolución 1409 de 2012).
- En caso de ser tratarse de un trabajo en alturas, el Coordinador debe: aplicar la normativa vigente en la materia y el programa de atención contra caídas de la empresa, identificar y verificar las condiciones de seguridad de trabajos en altura (para garantizar medidas preventivas en la labor a desarrollar), recibir por parte del servidor los reportes de daño de los equipos de trabajo en alturas. Adicionalmente, si se trata de personal contratista, el Coordinador deberá aplicar las disposiciones generadas en el Reglamento de la empresa para Seguridad y Salud en el Trabajo SST para contratistas.
- Finalmente, el Coordinador expedirá el **permiso de trabajo en altura** (Figura 137).
- En caso de no tratarse de un trabajo en alturas, el coordinador diligenciará **la lista de chequeo** (Figura 138) de trabajos rutinarios. En dicha lista de chequeo se verifican acciones alusivas a la planeación de la labor, a la inspección del área de trabajo y a la existencia y uso de los elementos de protección personal EPP adecuados para la labor a realizar (gafas de protección personal, calzado de seguridad, caretas, guantes, etc.)
- Antes de iniciar cualquier labor de trabajo en alturas, si no existe demarcación fija de la zona de peligro, el trabajador debe trasladar al sitio de operaciones cinta de señalización de color amarillo y negro combinados y conos de seguridad para realizar la demarcación de la zona de peligro. Para ello, debe cerrar completamente el área de peligro e instalar una barrera tipo III o tres anillos de cinta de seguridad asegurados a los conos de señalización (Figura 139).

Figura 136. Ejemplo de Permiso de trabajo en alturas
Tomado de [73]

PERMISO PARA TRABAJOS EN ALTURAS

Solicitado por: _____

o.	Nombres y Apellidos	Número de Cédula	Cargo	Proceso
1				
2				
3				

hora de solicitud: ____ AM Valido de ____ AM PM a ____ Extensión horaria: _____ Horas

M AM PM

ubicación del trabajo: _____ Descripción del trabajo: _____ Altura: ____ metros

b. SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL A IMPLEMENTAR
(Marque con una X SI o NO según corresponda)

ELEMENTOS	SI	NO	
*Arnés de cuerpo completo (Certificado Bajo Norma ANSI Z 359-1/92).			
Eslinga con absorbedor de impacto			
Eslinga con absorbedor de impacto dieléctrica			
Eslinga de Posicionamiento			
Talón Retráctil			
*kit línea de vida vertical portátil (línea, eslinga con absorbedor de impacto de 90 cm absorbedor/descendedor, pérgola + caja receptora, anclaje Portátil).			
*Kit línea de vida horizontal (línea de vida y 2 bandas de andaje).			
*Andamios (colgantes, tubular)			
Casco tipo I o tipo II con barbuquejo.			
Calzado de seguridad normal o dieléctrico			
Gautes (dieléctrico u otros).			
Protección auditiva			
Protección visual			
Protección respiratoria			
*Escalera de extensión (2 o 3 cuerpos)			
*Escalera tipo tijera			
*Escalera tipo plataforma			
*Elevador			

- Bloqueo de equipos eléctricos y mecánicos durante intervenciones de labores de Mantenimiento

Se entiende por bloqueo a la acción destinada a evitar mediante un elemento físico, el accionamiento de todos los mecanismos que suministran los distintos tipos de energía en la máquina/equipo a intervenir. En cada acción previa al bloqueo se debe verificar la existencia de energía cero. El bloqueo debe asegurar una desenergización permanente de los equipos a intervenir.

Cuando se van a realizar intervenciones eléctricas o mecánicas, así se haya desenergizándola máquina/equipo, una forma de garantizar que consciente o inconscientemente éste no será energizado hasta tanto no culminen las tareas de

Mantenimiento, es aplicando los candados de bloqueo (Figura 140). Un candado de bloqueo es un dispositivo aislador de energía, que físicamente impide el flujo o movimiento de energía, y se aplican en interruptores, válvulas, tableros eléctricos, etc.

Figura 137. Fragmento de lista de chequeo Tomado de [74]

Análisis de la tarea				
Ítem	Descripción	Sí	No	N/A
Planeación de la tarea				
1	¿Se cuenta con procedimiento específico y claro para la labor a desarrollar?			
2	¿Se dispone de los elementos necesarios para trabajar en alturas?			
3	¿El personal está certificado para desarrollar trabajos en altura?			
4	¿Se verificó que los sistemas de acceso cumplan con la distancia mínima de separación de 1,2m de circuitos eléctricos energizados?			
Área de trabajo				
5	¿El área de ejecución de la labor se encuentra limpia, ordenada, y es óptima para la ejecución de la tarea?			
6	¿Se señaló y delimitó el área de trabajo, teniendo en cuenta la zona de caída?			
EPP y verificación de sistema de protección contra caídas				
7	Casco con barbuquejo de 3 puntos de apoyo			
8	Guantes			
9	Botas de seguridad			
10	Gafas de seguridad			
11	Protección auditiva			
12	¿Están todos los trabajadores autorizados entrenados en el uso de los EPP y el sistema de protección contra caídas?			

Figura 138. Ejemplo de demarcación correcta de la zona de peligro
Tomado de [75]

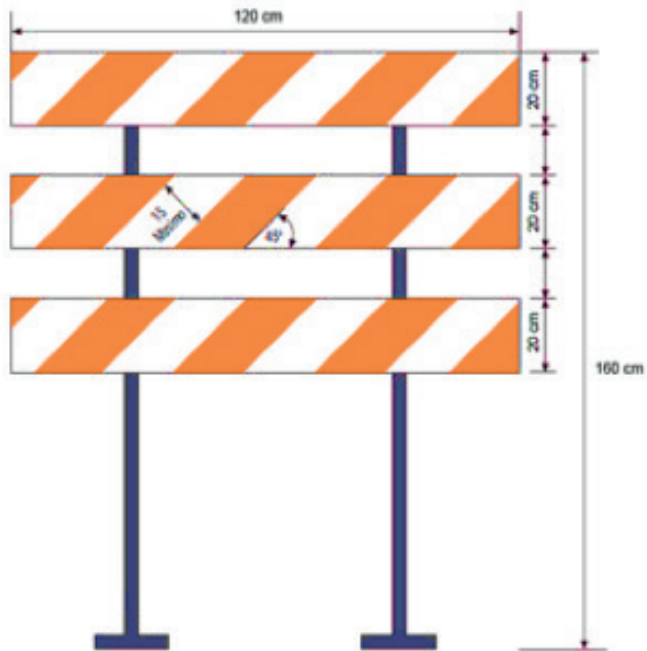
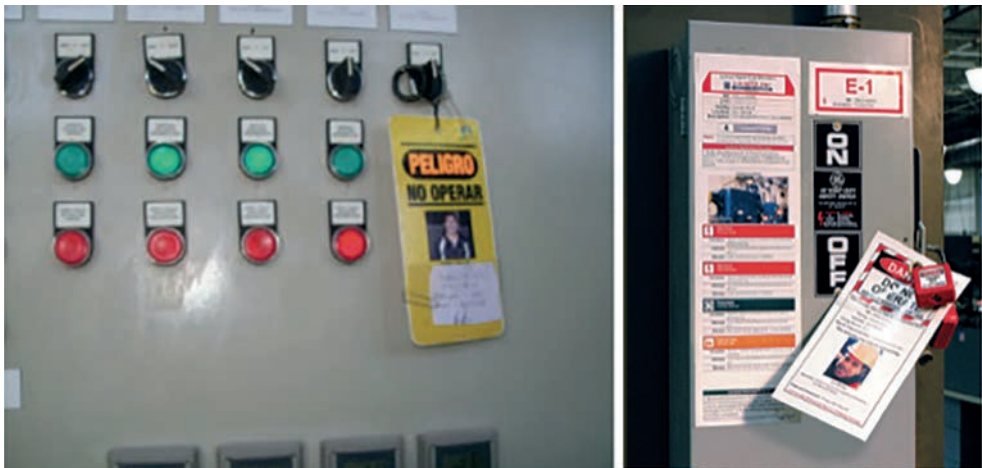


Figura 139. Candado de bloqueo. Tomado de [76]

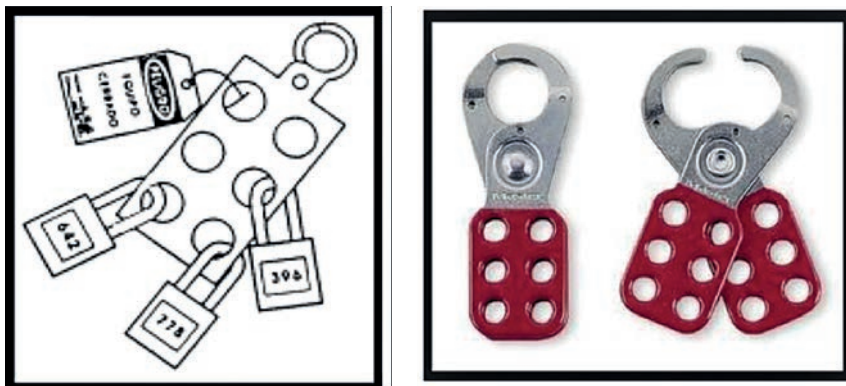


Adicionalmente, se pueden hacer uso de *Tarjetas de advertencia de bloqueo* (Figura 141), es decir un sistema de identificación y señalización que tiene como propósito advertir a otras personas (ejecutantes, supervisor, jefe de mantenimiento, operarios de producción, etc.) del bloqueo o la inmovilización del equipo, maquinaria, instalación o circuito de proceso. La tarjeta de advertencia contiene los datos y fotografía de la persona que efectuó el bloqueo, y se coloca siempre junto al candado de bloqueo, en lugar visible, para que se advierta claramente de la acción de bloqueo.

Figura 140. (a) Tarjeta de advertencia o bloqueo. (b) Candado de bloqueo y tarjeta de advertencia Tomado de [77, 78]



Cuando se trata de intervenciones de mantenimiento, en las cuales varias personas están interviniendo sobre una máquina o área, alimentada desde un mismo tablero eléctrico, y si la empresa cuenta con una cultura de seguridad elevada, un supervisor o líder instalará un porta-candados de seguridad (Figura 142) y sobre él cada uno de los ejecutantes instalará su candado de bloqueo personal (“su seguro de vida”); en la medida que cada quién vaya terminando irá retirando su respectivo candado, hasta que por último el supervisor o líder debe retirar el porta-candados. La máquina o equipo no se podrá energizar hasta que el último candado de bloqueo haya sido retirado.

Figura 141. Porta-candados de seguridad. Tomado de [79]

8.3. Algunas estadísticas de accidentalidad laboral en Colombia

Con el fin de “sensibilizar” un poco al lector acerca de la trascendencia de atender y aplicar la salud ocupacional y la seguridad industrial, se presentan a continuación algunas estadísticas de accidentalidad para Colombia, durante el año 2017 [80].

- Número de trabajadores afiliados	: 10237739
- a administradora de riesgo laborales	
- Número de accidentes del año	: 660 110
- Promedio/mes	: 55 009,0
- Promedio de accidentes laborales/día	: 1 808,5
- Promedio de accidentes laborales/hora	: 75,4
- Promedio de accidentes laborales/minuto	: 1,3
- Muertes en accidentes de trabajo	: 568
- Indemnizaciones por accidentes de trabajo	: 9347
- Indemnizaciones por enfermedad laboral	: 4 828
- Pensiones por invalidez	: 528

Preocupan las cifras de muertos e inválidos, puesto que ninguno de nosotros va al trabajo, pensando en salir de en bolsa negra o en silla de ruedas.

En la Figura 143 se presenta un gráfico de variación de la tasa de accidentalidad TA para Colombia. TA se calcula como número de accidentes x 100%, dividido entre el número de trabajadores afiliados. Una tasa de accidentalidad del 7% indicaría que ocurren 7 accidentes por cada 100 trabajadores, en el período en estudio.

Adicionalmente, la Tabla 34 presentan estadísticas de tasa de accidentalidad TA en el año 2017 para en Colombia, por sector económico. Las tasas de accidentalidad más elevadas corresponden a los sectores de Minas y canteras, industria manufactura, Construcción, y hoteles y restaurantes.

Figura 142. Tasa de accidentalidad TA para Colombia años 2017
Tomado de [80]



Índice de frecuencia bruta IFB (fórmula 19)

Corresponde al número de lesiones en el trabajo, con o sin tiempo perdido, ocurridos en 1 millón de horas-hombre de exposición. Se entiende la suma de las horas-hombre de exposición, a la suma de todas las horas-hombre del personal de la nómina en estudio.

Observación. Para el cálculo de IFB se contabilizan solamente los accidentes que ocurren mientras existe exposición al riesgo estrictamente laboral, es decir, se excluyen los accidentes “*in itinere*” (ocurridos en el trayecto de ida o vuelta al trabajo). Las horas-hombre de exposición, deben ser las de exposición al riesgo,

debiéndose excluir las correspondientes a enfermedades, permisos, vacaciones.

$$IFB = \frac{NLT}{HHE} \times 1\,000\,000 \quad (19)$$

Donde

IFB es el Índice de frecuencia bruta;

NLT es el número de lesiones durante el trabajo;

HHE son las horas-hombre totales trabajadas por el personal de la nómina en estudio.

La aplicación de la fórmula 19 arroja un índice global, es decir, una primera aproximación. Usualmente, se calculan IFB por separado para las áreas más riesgosas y para discriminar las lesiones que implicaron incapacidades, de las que no.

Tabla 34. Tasa de accidentalidad por sector económico - Colombia 2017
Tomado de [80]

SECTOR	TRABAJADORES	ACCIDENTES	TASA DE ACCIDENTALIDAD
Administración pública y defensa	621335	16636	2,68%
Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	388067	1019	0,26%
Comercio	1206482	66918	5,55%
Construcción	961739	88102	9,16%
Educación	677032	17590	2,60%
Eléctrico, gas y agua	69696	5106	7,33%
Financiero	330671	7202	2,18%
<i>Continuación Tabla 34</i>			
Hoteles y restaurante	253504	21681	8,55%

Índice de frecuencia neta IFN (fórmula 20)

Corresponde al número de lesiones en el trabajo, que impliquen tiempo perdido o incapacidades, ocurridos en 1 millón de horas-hombre de exposición. De nuevo, se entiende la suma de las horas-hombre de exposición, a la suma de todas las horas-hombre del personal de la nómina en estudio.

$$IFN = \frac{NLTP}{HHE} \times 1\,000\,000 \quad (20)$$

Donde

IFN es el Índice de frecuencia neta;

NLTP es el número de lesiones con tiempo perdido;

HHE son las horas-hombre totales trabajadas por el personal de la nómina en estudio.

Índice de severidad IS (fórmula 21)

Corresponde al total de días perdidos por incapacidad, con ocasión de un accidente laboral, ocurridos en 1 millón de horas-hombre de exposición.

$$IS = \frac{DPPI}{HHE} \times 1\,000\,000 \quad (21)$$

Donde

IS es el Índice de severidad;

DPPI es el número de lesiones con tiempo perdido;

HHE son las horas-hombre totales trabajadas por el personal de la nómina en estudio.

Factor de ausentismo FAu

La mayoría de los accidentes laborales se traducen en incapacidades, las cuales atentan contra la productividad de la organización y elevan el factor de ausentismo FAu (fórmula 22). Como se verá en el Capítulo 20, el FAu de ausentismo es necesario tenerlo en cuenta para estimar la cantidad de personal requerido por el departamento de mantenimiento.

$$FAu = \frac{DPP}{\frac{(I+F)}{2} \times DL} * 100 \quad (22)$$

Donde

- FAu* es el Factor de Ausentismo;
- DPP* son los días perdidos por ausentismo en el periodo;
- I* es el personal al inicio del periodo;
- F* es el personal al final del periodo;
- DL* son los días laborales durante el periodo.

El factor de ausentismo puede ser estimado y subdividido en: incapacidad debida a enfermedad, incapacidad debida a accidente, permiso para atender asuntos personales.

8.4. Algunos tips de Salud ocupacional y Seguridad Industrial

A continuación, se enuncian algunos consejos referentes a actitudes que debemos y no debemos tener, en relación con nuestra propia seguridad, y la del personal a nuestro cargo.

- **El único responsable de mi seguridad soy YO mismo.** Uno no acude al sitio de trabajo a morir, a quedar incapacitado o lesionado. Tampoco tiene sentido culpar a los demás por las precauciones que Yo no tomé.
- **Las normas de Seguridad Industrial son normas de vida.** No son por molestar o por paranoia. **En su empresa / sitio de trabajo /casa, siempre escúchelas y póngalas en práctica.**
- **Al llegar a una Planta o sitio de trabajo desconocido debo actuar con tranquilidad y cautela. Debo estar atento a todas las indicaciones y avisos de Seguridad industrial.**
- **Atención a la comunicación verbal y no verbal.** Nunca se debe asumir que la otra persona escuchó, vio, entendió. Es necesario preguntar e insistir cuantas veces sea necesario. La industria está plagada de recuerdos y estadísticas de gente que se lesionó, se incapacitó o murió porque “le pareció”, “creyó”
- La Seguridad Industrial no la garantiza ni la dotación, ni la señalización, ni la perfección de las construcciones o las máquinas, reside fundamentalmente en la ACTITUD proactiva y preventiva y en la receptividad de las personas.

- En ausencia de candados de bloqueo u otros elementos similares, siempre avise de su intención o propósito y esté seguro de recibir respuesta antes de proceder (sobre todo en pruebas de equipos).
- En ocasiones así se extremen las precauciones y cuidados el riesgo de accidente continua latente.
- Cualquier máquina por inofensiva que parezca es peligrosa.
- Generación desconectada (*unplugged*). Es común ver gente joven cruzando la calle “secuestrados y transportados” por el *smartphone*, sin percatarse de los riesgos a los cuales están expuestos o en los riesgos a que están exponiendo a sus congéneres. **Acción proactiva:** Reconectarse y aterrizar.

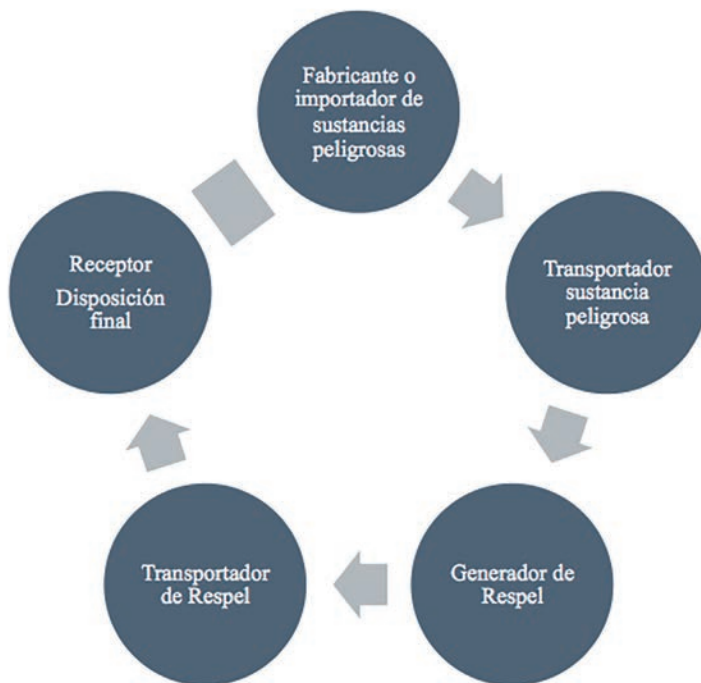
8.5. Manejo de residuos peligrosos RESPEL

Los residuos o desechos peligrosos RESPEL, comprenden aquellos residuos que por sus características corrosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radioactivas pueden causar riesgo para la salud humana y el ambiente (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Decreto 4741/2005).

El Decreto 4741 de 2005 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Tiene por objeto prevenir la generación de residuos peligrosos, así como regular el manejo de los residuos generados con el fin de proteger la salud humana y el ambiente.

Algunos ejemplos de RESPEL comunes son: Baterías / Llantas / Aceites lubricantes usados / Filtros / Transformadores (PCB) / lubricantes de corte / paños y trapos contaminados con RESPEL / Combustibles utilizados para limpieza o producto de derrames / Lodos, arenas, gravas / etc.

En la Figura 144 se muestra gráficamente la relación que existe entre los diferentes actores involucrados con los RESPEL.

Figura 143. Relación entre los actores en el proceso de gestión de RESPEL

La Resolución 1362 de 2007 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, establece los requisitos y el procedimiento para el Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos, a que hace referencia los artículos 27 y 28 del Decreto 4741 de 2005. Tiene por objeto establecer los requisitos y el procedimiento para el registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos, como instrumento de captura de información, con la finalidad de contar con información normalizada, homogénea y sistemática sobre la generación y manejo de residuos o desechos peligrosos.

Clasificación de los generadores de RESPEL:

- Gran Generador: entidad o persona que genera residuos o desechos peligrosos en una cantidad igual o mayor a 1 000 kg/mes.
- Mediano Generador: persona o entidad que genera residuos o desechos peligrosos en una cantidad igual o mayor a 100 kg/mes y menor a 1 000 kg/mes.

- Pequeño Generador: persona o entidad que genera residuos o desechos peligrosos en una cantidad igual o mayor a 10 kg/mes y menor a 100 kg/mes.

Debiera ser claro que los departamentos de mantenimiento deben coadyuvar al adecuado manejo de los RESPEL, iniciando con la clasificación y cuantificación de los desechos generados con ocasión de su labor. Regularmente el trabajo del programa RESPEL se hace conjuntamente entre los COPASST, Mantenimiento, Producción, y con el apoyo de la Gerencia.

Un programa RESPEL sirve para:

- Determinar el tipo de residuos peligrosos que se generan como resultado de la actividad de la empresa.
- Cuantificar las cantidades de residuos / tipo.
- Trazar las políticas y acciones que se deben tomar y seguir para el manejo integral de los residuos, conforme a la normatividad ambiental vigente.
- Diagnosticar, capacitar y diseñar el plan de gestión de recursos, de adecuación física, de almacenamiento temporal y entrega al receptor final.

En la Figura 145 se presenta una imagen de residuos peligrosos indebidamente almacenados. si los residuos han de almacenarse a la intemperie, los recipientes deberán ser herméticos, lo cual no se cumple en este caso particular.

Figura 144. Almacenamiento inadecuado de productos RESPEL. Tomado de [81]



Algunas compañías se dedican a diseñar y fabricar contenedores para el almacenamiento temporal adecuado de los RESPEL, tal como se aprecia en la Figura 146.

Figura 145. Bodega comercial para almacenamiento de residuos RESPEL
Tomado de [82]



El adecuado manejo de los productos RESPEL puede ser asesorado por:

- Secretarías seccionales o distritales de Ambiente, vía *Manuales de buenas prácticas de manejo de...*
- Fabricantes del producto. Manual de servicio
- Proveedores

La ley tiene establecido que, si alguno de los actores de la cadena de gestión de productos RESPEL causa perjuicios a personas o al medio ambiente, se puede incurrir en responsabilidad civil, penal y administrativa.

Responsabilidad Civil

Artículo 2341 del código civil colombiano. Obligación jurídica de resarcir o compensar económicamente por los daños causados al ambiente

Art. 2341. El que ha cometido un delito o culpa, que ha inferido daño a otro, es

obligado a la indemnización, sin perjuicio de la pena principal que la ley imponga por la culpa o el delito cometido

Responsabilidad penal:

La que se genera por la omisión de una conducta que las normas penales hayan calificado como delictiva.

- Lesiones personales
- Cometido con un medio idóneo para crear un peligro común: (incendio, inundación, descarrilamiento, etc.)
- Homicidio culposo o negligente
- Homicidio simple
- Homicidio agravado
- Otros

Responsabilidad administrativa

Responsabilidad administrativa, para imponer acciones y medidas preventivas en los términos de los artículos 83 y siguientes de la ley 99 de 1993 o por violación a las normas ambientales que resultan aplicables al manejo de residuos o desechos peligrosos y la posibilidad de que el Estado exija de los particulares, o bien que éstos exijan de aquel, determinadas acciones y resultados en relación con el manejo de dichos residuos.

CAPÍTULO NUEVE

La mantenibilidad y la ejecución de tareas de mantenimiento

9.1. Introducción

En la Figura 3 (numeral 1.2.3) se muestra la dinámica general de un departamento de mantenimiento, de la cual en el Capítulo 13 se hablará sobre las actividades de *Programación y Planeación*. En el presente capítulo se presentan unos apuntes breves, relativos a la actividad de ***Ejecución de las tareas de mantenimiento***. Como se mencionó en el numeral 1.4, lo concerniente a *Ejecutar* corresponde obviamente a acciones de índole *operativa* y dado que la formación universitaria (a nivel Tecnológico y Profesional) no tiene alcance en competencias prácticas, y puesto que la variedad de sistemas físicos sobre los que se podría intervenir es sumamente amplia, se trazarán unas pautas generales, acerca de intervenciones sobre máquinas/equipos, pensando en que los futuros Ingenieros y Tecnólogos deberán supervisar trabajos, planear, programar y dirigir montajes y reparaciones (ver numeral 2.6). Se espera que estas *pautas generales básicas* definan lineamientos, que puedan aplicar con éxito los actuales estudiantes en su futura vida laboral. Cada gremio industrial específico posee sus propios estándares técnicos, los cuales guían la ejecución de tareas propias de su campo, y deberán ser consultadas por el interesado.

9.2. Pautas generales para comprender un proceso / máquina o equipo

Al igual que en muchas otras situaciones, lo primero antes de enfrentar un problema es comprenderlo, y aplicado al caso de la maquinaria se plantean los siguientes pasos:

- Comprender la operación de la máquina/equipo, en cuanto a entradas de materia prima, salida de producto, retales y efluentes (ver Figura 1 numeral 1.2.1).
- Identificar el tipo de energía que requiere la máquina (electricidad, gas, coque, *fuel oil*, bagazo, etc.) y los servicios que requiere para la operación (agua, aire comprimido, vapor, etc.).
- Identificar el principio de operación de la máquina.
- Identificar los *subsistemas o módulos* típicos principales de la máquina:

Chasis, bastidor o estructura

Accionamientos (fuente de energía y transmisiones)

Actuadores o efectores finales

Elementos de mando y maniobra

Elementos de seguridad como las paradas de emergencia

- Identificar y comprender el esquema cinemático de la máquina, es decir, la transformación de la energía desde el motor, pasando por las transmisiones (de todo tipo) hasta llegar a los actuadores o efectores finales.
- Estudiar (o determinar) y comprender los procesos secuenciales de detención y arranque de proceso/máquinas, sobre todo en grandes sistemas (centrales térmicas, hornos cementeros, sistemas de vapor, etc.).

En la actualidad la mayoría de nuevos procesos/máquinas/equipos han sido concebidos como *sistemas mecatrónicos* (o como sistemas de la *industria 4.0*), cuya concepción general se muestra en la Figura 147. Si ésta es la situación, es conveniente y necesario de manera adicional, identificar y comprender los subsistemas de sensorica, de procesamiento de información y la interfaz Hombre-máquina, con el objetivo de adquirir una visión holística del sistema mecatrónico.

9.3. Mantenimiento de preparación

Por complejo y sofisticado que sea un proceso/máquina/equipo siempre será necesario efectuarle como mínimo las siguientes tareas básicas:

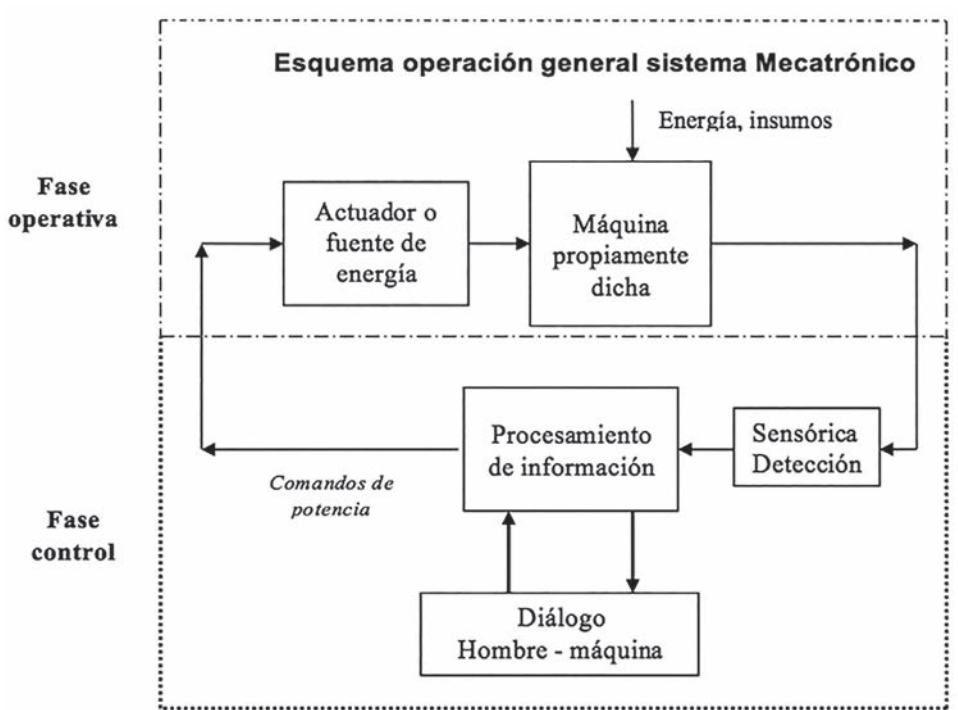
- Limpieza
- Ajustes menores
- Lubricación básica
- Inspecciones
- Reportes

Estas tareas pueden ser ejecutadas por personal de mantenimiento o por los operadores de la máquina/equipo si han sido entrenados para ello (como en el caso del TPM *Capítulo 5*). De cualquier manera, la ejecución de las tareas básicas implica que responsablemente se debe:

- Respetar las directrices de seguridad industrial.
- Utilizar los insumos y elementos adecuados.

- Capacitar los operadores de máquina o personal de mantenimiento, tanto para ejecutar, como para inspeccionar y reportar.
- Definir los procedimientos de inspección.
- Elaborar los formatos de inspección y reportes.

Figura 146. Esquema general de un sistema mecatrónico
Tomado de [71]



Más allá de las tareas básicas, aparecen tareas más complejas como montajes, calibraciones, puestas a punto, cambios de partes, reparaciones, modificaciones, *overhaul*, las cuales regularmente son ejecutadas por personal de mantenimiento propio o por personal subcontratado especializado. De cualquier manera, los Ingenieros, Tecnólogos, Supervisores, deben planear y programar una serie de tareas genéricas previas a la intervención de una máquina/equipo, las cuales en la Figura 9 (numeral 1.5) fueron llamadas **Mantenimiento de preparación** o **Mantenimiento de alistamiento**, el cual es común o transversal a todos los demás sistemas de alistamiento.

Las tareas genéricas del Mantenimiento de preparación son:

- Definir claramente la tarea a efectuar, su alcance (montaje, reparación, modificación, overhaul, etc.) y su probable duración. Definir tiempos *realistas* (ni optimistas ni pesimistas).
- Estudiar catálogos, planos, manuales y comprender y definir el orden operacional. **Seguir el procedimiento descrito en 9.2**
- Definir el personal directo e indirecto requerido (ejecutantes, supervisores, jefes, etc.), con base al orden operacional y la duración de la tarea. Definir los turnos si la duración de la tarea lo amerita.
- Elaborar listado de repuestos, insumos, partes fabricadas, equipos de apoyo, requeridos.
- Elaborar listas de chequeo.
- Alistamiento de repuestos e insumos genéricos (estandarizados).
- Alistamiento de repuesto especiales o repuesto-máquina (ver *Capítulo 16*)
- Fabricación de partes especiales.
- Tener ubicados talleres por si durante el desmontaje aparecen imprevistos que impliquen fabricación.
- Alistamiento de equipos de apoyo (vehículos, grúas, polipastos, estrobos, cadenas, cables, etc.).

Una intervención o tarea importante que sea *preparada* con este método tendrá una probabilidad muy alta de culminar con éxito, con calidad y dentro de los tiempos estimados, a menos que ocurran casos fortuitos. Las listas de chequeo son muy importantes y la recomendación es *no decirse mentiras*, la intervención no está completamente planeada y programada si todos los ítems de la lista no aparecen con el símbolo √.

9.4. Mantenibilidad

A pesar de que en el Capítulo 12, se trabajará numéricamente con el concepto de Mantenibilidad, es muy pertinente presentarlo aquí desde un punto de vista conceptual y pragmático.

Definición 1 Mantenibilidad. Propiedad de un *Equipo o Sistema* que representa la cantidad de esfuerzo requerida para conservar su funcionamiento normal o para restituirlo una vez se ha presentado un evento de falla. Se dirá que un sistema es *Altamente Mantenable* cuando el esfuerzo asociado a la restitución sea bajo. Sistemas *Poco Mantenibles* o de *Baja Mantenibilidad* requieren de grandes esfuerzos (horas-hombre, supervisión, repuestos, insumos) para sostenerse o restituirse.

Definición 2 Mantenibilidad. Probabilidad de que un equipo pueda ser puesto en condiciones operacionales en un período de tiempo dado, cuando el mantenimiento es ejecutado de acuerdo con procedimientos preestablecidos.

La *Mantenibilidad* depende de factores intrínsecos al sistema y de factores propios de la organización del Mantenimiento.

Entre otros muchos factores externos al proceso/máquina/equipo o sistema (Departamento de Mantenimiento) están: el ambiente físico y laboral, las políticas de Mantenimiento, el número de operarios y sus niveles de destreza y de especialización, la disponibilidad de repuestos, los procedimientos de ubicación de fallas y de control de trabajo, la calidad de la documentación, los recursos disponibles para la ejecución de las actividades (espacio de trabajo, talleres, máquinas, equipos de prueba, equipos de levantamiento y manejo de materiales equipos especializados, etc.).

Entre los factores intrínsecos al proceso/máquina/equipo o sistema está el diseño del sistema o de sus subsistemas que lo conforman, para los cuales el *Diseño inicial* determina los procedimientos de Mantenimiento y la duración de los tiempos de reparación, ello va en relación con la *Modularidad*, la *accesibilidad*, la *estandarización* e *intercambiabilidad* de los componentes usados.

De otro lado, es necesario tener en cuenta que una *máquina o sistema* normalmente es la suma de varios subsistemas, lo que puede ocasionar que dicho *sistema* posea una alta *Mantenibilidad* para unos tipos de fallo, pero otra muy baja para otros. Ejemplo, un automóvil, que respecto del reemplazo de un neumático puede ser catalogado como de alta mantenibilidad, pero no lo es para un reemplazo del cigüeñal, por ejemplo.

La reflexión que se pretende desarrollar aquí está orientada a que se le dé una mirada a la influencia del Diseño de un equipo en su posterior Mantenibilidad. En Mantenimiento hay una máxima que dice que ***Un buen Mantenimiento comienza con un buen diseño***. La anterior afirmación indica que, para una misma función, haya equipos de mejor tecnología, de mayor costo de adquisición, con menores costos de mantenimiento y con una vida útil muy larga, o todo lo contrario, es decir, equipos “desechables”. La Figura 148 ilustra gráficamente esta situación. La Figura

149 muestra un sencillo sistema Motor – reductor – Resistencia mecánica, al cual se le hará una estimación cualitativa de su posterior *Mantenibilidad*, partiendo de un análisis de su diseño preliminar.

Figura 147. Curvas de Costo Remanente CR contra Costo de Mantenimiento CM en función de la tecnología de fabricación del equipo
Tomado de [12]

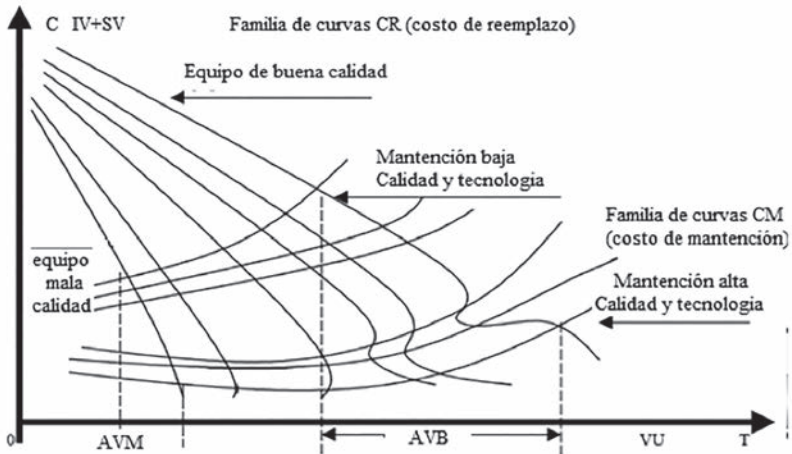
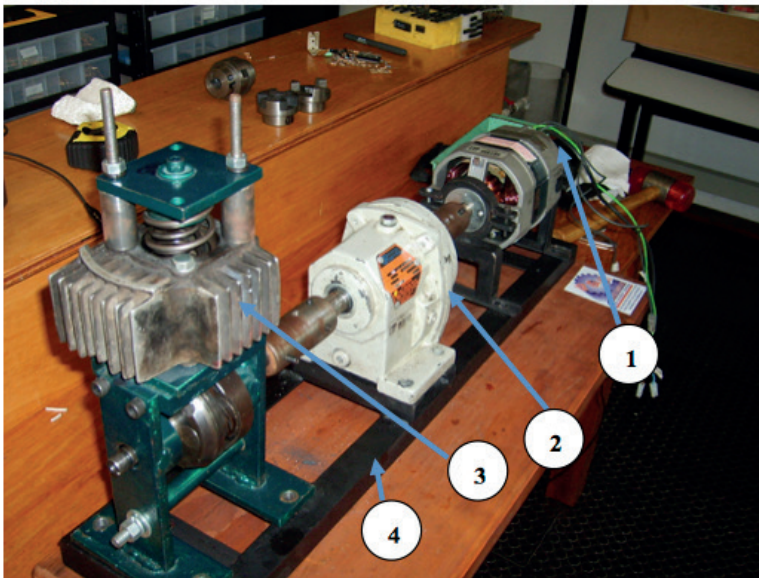


Figura 148. Sistema Motor - reductor - Resistencia mecánica. Tomado de [3]



El sistema consta de los siguientes subsistemas:

- 1: Motor de corriente continua.
- 2: Reductor de velocidad.
3. Sistema mecánico resistivo.
- 4: Bastidor.

Desde el punto de vista de la *modularidad*, el sistema fue bien concebido.

Una mirada rápida al sistema no hace evidentes problemas protuberantes en el montaje y aparentemente no se prevén problemas durante su operación.

Cuando se energizó el sistema, surgieron ruidos y vibraciones anormales, se entró a desarmar el conjunto, a analizar los subsistemas y se encontraron una serie de anomalías.

Anomalía 1 (Figura 150). Acoples totalmente rígidos, que no se corresponden con ningún acople estandarizado (elemento *no estandarizado y no intercambiable*), y que en términos prácticos no admiten desalineación entre los ejes.

Figura 149. Acoples no estandarizados y excesivamente rígidos
Tomado de [3]



Anomalía 2 (Figura 151). La ubicación de los centros de algunos agujeros no se hizo de una manera rigurosa, sino “a ojo”, lo que ocasionó que los agujeros de la base del motor no coincidieran con los de la base principal. Los equipos y componentes al atornillarlos a una estructura deben quedar “libres”; si se arriman o posicionan forzosamente se generan flexiones tanto de la estructura como de los ejes, y se inducen precargas en rodamientos, bujes y acoples (Ver fenómeno de “pata suelta” en el *Capítulo 4*).

Anomalía 3 (Figura 152). Pésimo posicionamiento y ejecución de algunos de los agujeros del sistema mecánico resistivo. El detalle mostrado origina que parte del par de apriete de los tornillos se pierda y con la posterior operación del equipo, la tornillería se afloje paulatinamente quedando los componentes sueltos.

Figura 150. Agujeros mal trazados

Tomado de [3]

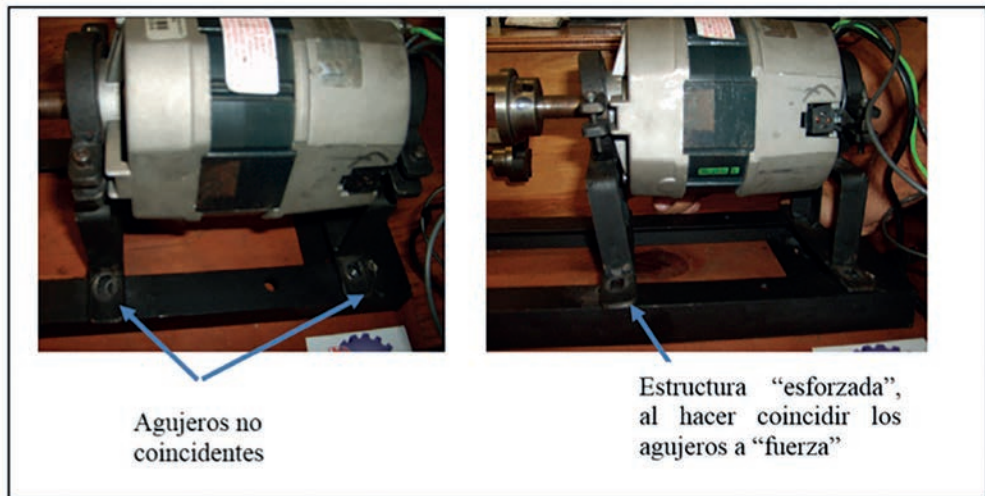
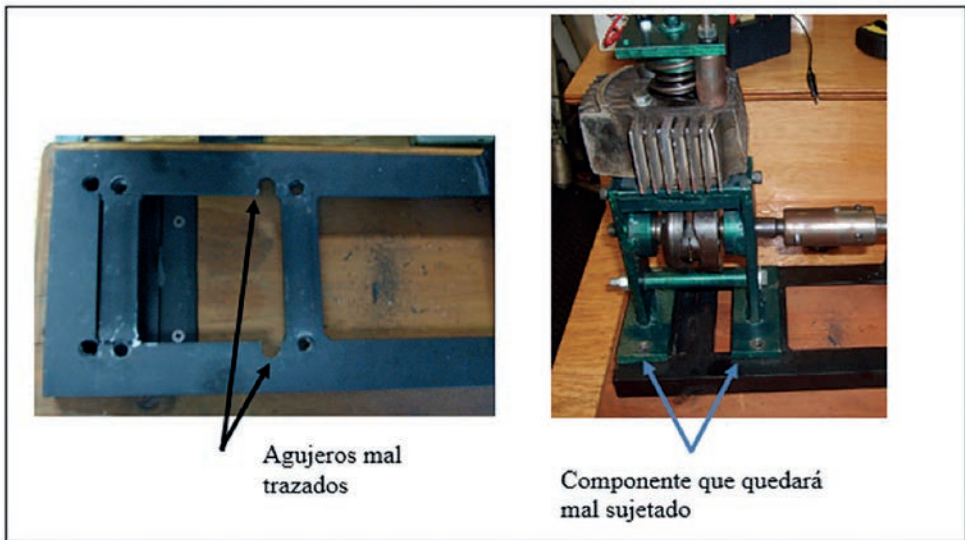


Figura 151. Agujeros mal trazados y elaborados. Tomado de [3]



Anomalía 5 (Figuras 150, 151 y 152). El motor y la carga resistiva no poseen niveladores ni empujadores, para propósitos de alineación. Esta situación sumada a los acoples rígidos no estandarizados, conllevan a un montaje totalmente rígido y *no Mantenable* en este aspecto.

¿Qué falló en este diseño inicial?

- No hubo un croquis o plano de los tamaños de los componentes y su ubicación en la estructura o bastidor.
- No se aplicaron los conceptos de *Estandarización e intercambiabilidad*.
- No se concibió la *mantenibilidad* puesto que no se contemplaron niveladores y empujadores para el alineamiento.
- Fallaron procesos simples de fabricación como el trazado y ejecución agujeros

Este es un contra-ejemplo de lo que no se debe hacer, si se espera una alta mantenibilidad de un sistema.

¿Soluciones probables? Prácticamente tomar los componentes principales motor, reductor y carga resistiva e iniciar de nuevo el diseño, la fabricación y montaje.

9.5. Recomendaciones de mantenimiento alrededor de los elementos estandarizados e intercambiables

Acaba de mostrarse un ejemplo en el que se hizo evidente que el no usar elementos estandarizados e intercambiables conlleva a problemas de mantenibilidad, pero es necesario tener claridad que el solo hecho de utilizarlos no garantiza la inexistencia de una serie de problemas menores que entorpecen y atentan contra la Mantenibilidad. La tabla 35 relaciona una serie de elementos estandarizados e intercambiables, de carácter genérico y común a múltiples máquinas. Para cada elemento se hace una recomendación, relacionada con errores técnicos comunes durante su utilización, los cuales finalmente afectarán la Mantenibilidad, en mayor o menor medida.

Tabla 35. Errores comunes en el uso de elementos estandarizados e intercambiables

Ítem	Elemento estandarizado	Recomendación	Justificación
1	Tornillería	Identificar si la máquina está hecha en sistema inglés o métrico. No hacer mezclas de tornillería métrica con inglesa o de otras normas	Se dañan los agujeros roscados. Al momento de hacer las compras aumentan las referencias a adquirir y almacenar. Al momento de hacer ajustes o reparaciones, es necesario utilizar mayor cantidad de herramienta (llaves, machuelos, terrajas) y aumenta la laboriosidad y duración de la tarea
2	Tornillería	Al recambiar la tornillería utilizar al menos la misma calidad previa y aplicar el par de apriete acorde al tamaño y calidad	Por defecto o exceso de par de apriete, o se afloja la tornillería o se fatiga prematuramente
3	Tornillería	Utilizar en lo posible arandelas de presión (wasas) y cambiarlas luego periodos prolongados de operación	Las wasas se deforman plásticamente y luego de un periodo prolongado de uso se aplanan y ya no cumplen su función
4	Retenedores o sellos	Identificar si la máquina está hecha en sistema inglés o métrico. No hacer mezclas de retenedores métricos por sus "equivalentes" en pulgadas o viceversa	Aunque aparentemente los tamaños de un sistema a otro sean similares, hay pequeñas diferencias que harán que el sello "apriete" mucho el eje (generando "cuello") o quede holgado (quedando fuga en el sistema)
5	Rodamientos	Observar los procedimientos de montaje y desmontaje. No intercambiar rodamientos sellados por rodamientos de lubricación en baño de aceite	La posibilidad de insuficiencia de lubricación y posterior daño es muy alta
6	O´ring o juntas tóricas	Se recomienda cambiarlos cuando se hagan desmontajes	Las juntas tóricas se aplanan, y al reutilizarlas no vuelven a llenar las cavidades de la misma forma, generándose fugas regularmente
7	Empaquetaduras	Respetar el material y espesor del empaque original, a menos que haya una razón fuerte para efectuar cambios.	Empaques de materiales no adecuados, más gruesos o más delgados, pueden llevar a fugas, daños o malas operaciones (elementos frenados, interferencias, etc.)

8	Correas en V	Si son transmisiones de correas, múltiples, conseguir las de la misma marca y del mismo lote de fabricación.	Para que en operación sean de la misma longitud, y el funcionamiento del conjunto sea uniforme, silencioso y suave
9	Transmisiones por correa	Cuando se hace necesario cambiar una de las dos poleas, cambiar en lo posible la otra, y también las correas	Regularmente si la canal de una polea está deteriorada, la de la compañera también lo estará, al igual que las correas. Si no se hace esto las correas nuevas se deteriorarán rápidamente
10	Transmisiones por correa	Consultar y aplicar la tensión adecuada para el conjunto particular, en función de la distancia entre centros y del tipo y n° de correas	La recomendación típica de "Oprimir con el dedo la parte central de la correa y verificar que se desplace 1cm", solo aplica en unos pocos casos. Por lo demás pueden quedar excesivamente tensadas o flojas, y en ambos casos su vida útil será muy corta.
11	Transmisiones por cadena	Cuando se hace necesario cambiar la cadena por desgaste o estiramiento,	Si se cambia solo uno de los sprockets y la cadena, el otro
		verificar el estado de los sprockets, y cambiar en lo posible. Evite cambiar solo uno de los dos sprockets	sprocket (que regularmente también está deteriorado) dañará rápidamente la cadena.
12	Aceites	Consultar el manual de la máquina o vehículo, y reemplazar respetando la especificación	Las viscosidades, aditivaciones y tipos de servicio no se pueden cambiar indiscriminadamente, puesto que se le pueden infringir daños sistémicos a los sistemas
13	Líquidos de frenos	Consultar el manual de la máquina o vehículo, y reemplazar respetando la especificación. No mezcle líquidos de diferentes DOT	Las mezclas de diferentes DOT pueden llegar a inflamarse y provocar incendios
Elementos flanchados o bridados		Antes de desarmar conjuntos motor-reductor, motor-ventilador, flanches o bridas, ejes, acoples, etc., haga un par de marcas para identificar como estaban y vuelva y arme a la misma posición	Regularmente la tolerancia geométrica de posición se altera al rotar un elemento con respecto al otro, y o no acoplan o se introducen pre-esfuerzos o desbalanceos
Parejas de máquinas o equipos (Conjuntos grupo motor – bomba/ventilador/reductor)		Antes de desarmar conjuntos motor-reductor, motor-ventilador, motor-bomba, etc., haga una marca o trazo de las bases sobre la estructura o piso. para identificar como estaban y volver a y armar en la misma posición	Al seguir esta simple recomendación se hace más rápido y simple el proceso de alineamiento, o en caso de no poder hacerlo, el desalineamiento que se introduce es mínimo.
Parejas de máquinas o equipos (Conjuntos grupo motor – bomba/ventilador/reductor)		Antes de desarmar, demarcar ("rayar" el sitio donde estaban ubicados ambos elementos del conjunto	Independiente de si se va a efectuar de nuevo alineamiento, esta sencilla tarea reducirá la laboriosidad, puesto que permitirá reubicar los elementos donde previamente estaban (probablemente funcionando adecuadamente)

CAPÍTULO DIEZ

Fundamentos de lubricación

10.1. Introducción

En los numerales 1.1 y 1.5.3 se mencionó que existen una serie de tareas básicas y genéricas que se le deben efectuar a las máquinas/equipos de las diferentes industrias, ellas son:

- Limpieza
- Ajustes menores
- Lubricación básica
- Inspecciones
- Reportes

Por otro lado, en el Capítulo Tres, relativo al Mantenimiento Preventivo, se indicó que la lubricación forma parte de las 4 tareas genéricas en las cuales se basa éste. Es conveniente recordar que el Mantenimiento Preventivo se le llama también Mantenimiento LEMI, con *L* de Lubricación.

En este capítulo es de interés lo concerniente a *Lubricación*, y a pesar de que haya sido mencionada como una tarea *básica*, de ninguna manera se debe pensar que es una cuestión simple, por el contrario, su trasfondo es muy amplio y complejo. Hay muchas empresas de clase mundial dedicadas a investigar y desarrollar nuevos o mejores productos y métodos de lubricación. Las consecuencias de lubricar inadecuadamente conllevan a la deficiente operación de las máquinas/equipos, y posteriormente a daños, en caso de persistir la situación. La lubricación inadecuada atenta contra la productividad, puesto que la máquina/equipo opera con fricción elevada, reduciendo su rendimiento y consumiendo más energía de lo normal; en términos simples, una máquina/equipo indebidamente lubricada consume más energía, produce menos y se deteriora rápidamente.

10.2. Definiciones básicas

A continuación, se presentan una serie de conceptos y definiciones, necesarios para comprender el panorama de la Lubricación.

10.2.1. Tribología

Del griego *tribos*, “frotar o rozar”, es la ciencia que estudia la **fricción**, el **desgaste** y la **lubricación** que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento

10.2.2. Fricción

Fuerza de rozamiento o fuerza que se *opone* al movimiento relativo, entre dos superficies en contacto. Puede ser aquella que se opone al movimiento entre ambas superficies cuando el movimiento ya se ha establecido (fuerza de fricción dinámica), o la fuerza que se opone al inicio del movimiento (fuerza de fricción estática).

La fricción depende de múltiples factores, entre ellos la textura, rugosidad o acabado de las superficies, velocidad de operación, la forma de los cuerpos, sus materiales, pesos, tamaños, entre otros. La Figura 153 presenta una vista ampliada de las imperfecciones microscópicas, principales causantes de la fricción. La fricción genera *desgaste* en las piezas.

10.2.3. Desgaste

Es la erosión de un material (superficie sólida) por acción de otra superficie. El desgaste puede ser:

- Desgaste Adhesivo (Figura 154)
- Desgaste abrasivo (Figura 155)

Figura 152. Esquema explicativo básico el origen de la fricción. Tomado de [83]

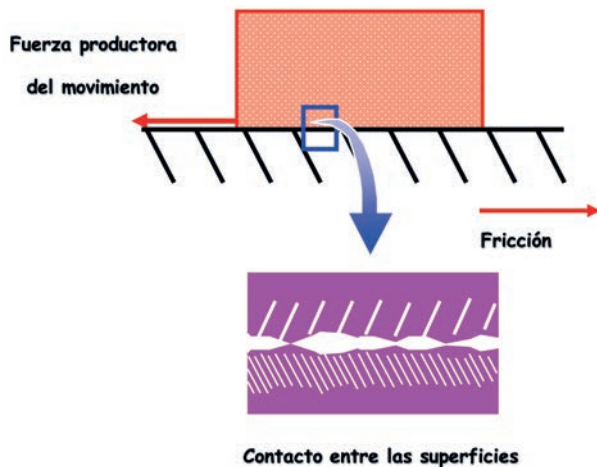


Figura 153. Esquema explicativo del Desgaste adhesivo
Tomado de [83]

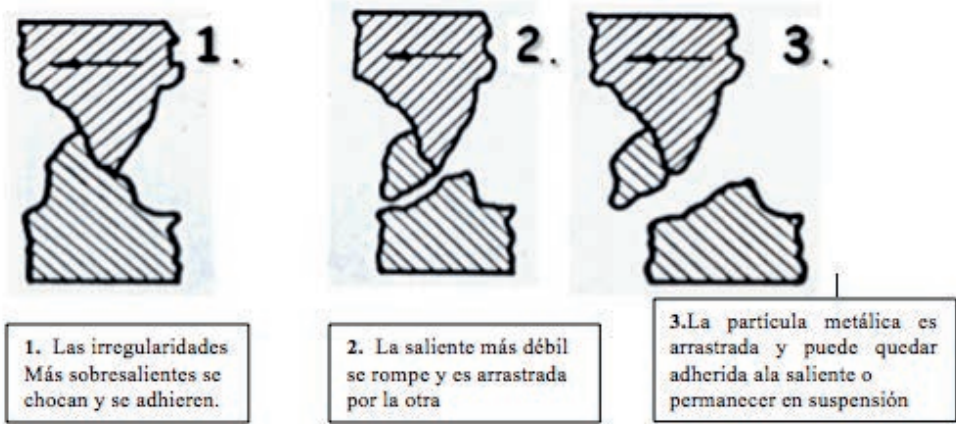
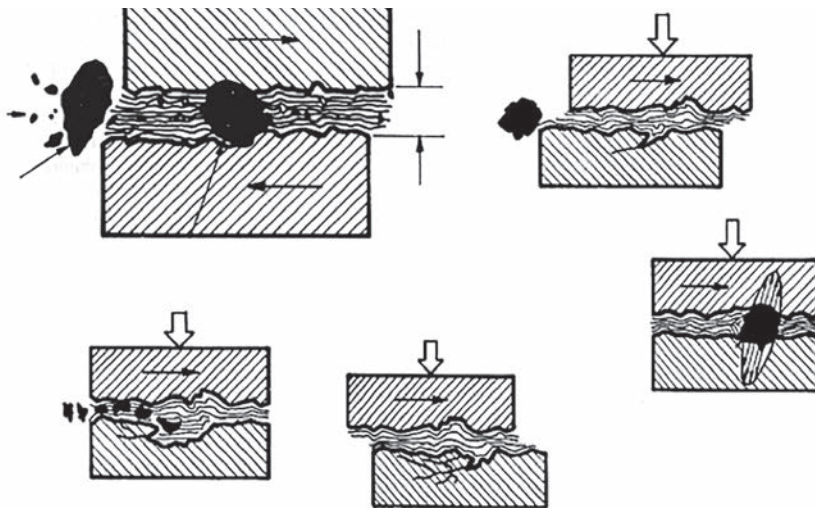
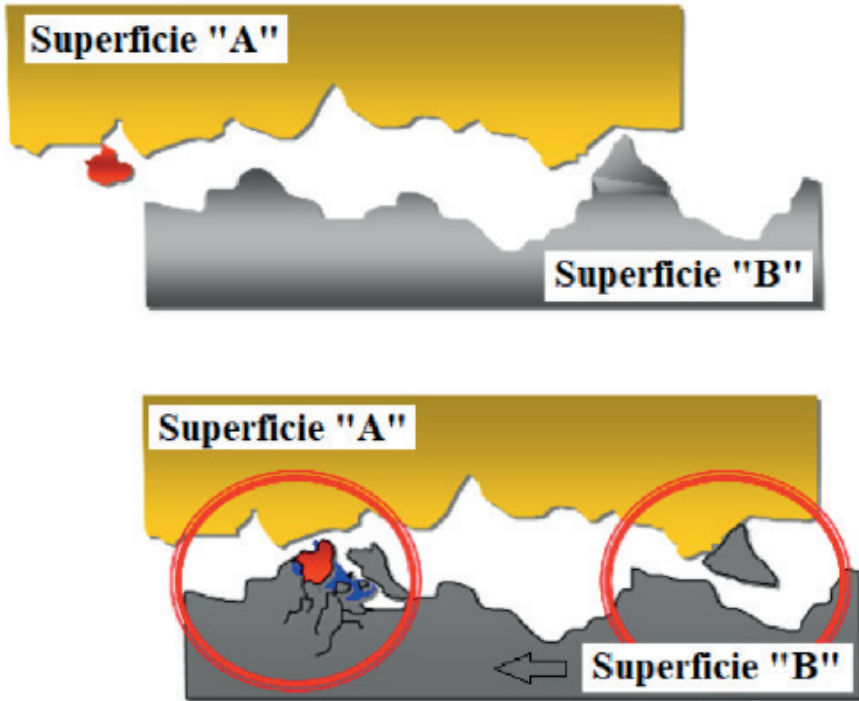


Figura 154. Esquema explicativo del Desgaste abrasivo. Tomado de [83]



La Figura 156 presenta de manera combinada el desgaste adhesivo y el desgaste abrasivo.

Figura 155. Desgaste adhesivo y abrasivo combinados Tomado de [83]



10.2.4. Viscosidad

Parámetro que mide la oposición o resistencia de un fluido a fluir. La viscosidad es evaluada experimentalmente haciendo uso de la *Ley de Viscosidad de Newton* (fórmula 23), donde μ representa la *viscosidad dinámica* o *absoluta* (se expresa en *centiPoise cP*, sistema c.g.s), a partir de esta viscosidad se determina la *viscosidad cinemática* ν (fórmula 24), cuyo uso para caracterizar los aceites está más ampliamente difundido (se expresa en *CentiStocke cSt* sistema c.g.s).

$$\tau = \mu \left(\frac{dU}{dy} \right) \quad (23)$$

Donde

τ es el esfuerzo cortante que sufre el fluido;

μ es la viscosidad dinámica del fluido;

es el cambio de velocidad de la plaza móvil, con respecto al espesor

de la película (ensayo clásico para la determinación de la velocidad).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (24)$$

Donde

ν es la viscosidad cinemática del fluido;

ρ es la densidad del fluido

10.2.5. Lubricante

Fluido que se interpone entre dos superficies, para evitar su contacto directo, y por ende la fricción, el desgaste y posterior deterioro.

10.2.6. Lubricar

Acción de interponer una película de lubricante entre dos superficies que han de tener un movimiento relativo entre sí, para evitar la fricción y el desgaste.

La curva de *Stribeck* (Figura 157) representa el comportamiento del coeficiente de fricción de un conjunto mecánico, para diferentes viscosidades del lubricante, apreciándose 3 regiones bien diferenciadas, en función del valor que tome el coeficiente de lubricación C_{lu} (fórmula 25): Lubricación límite, Lubricación mixta y Lubricación hidrodinámica.

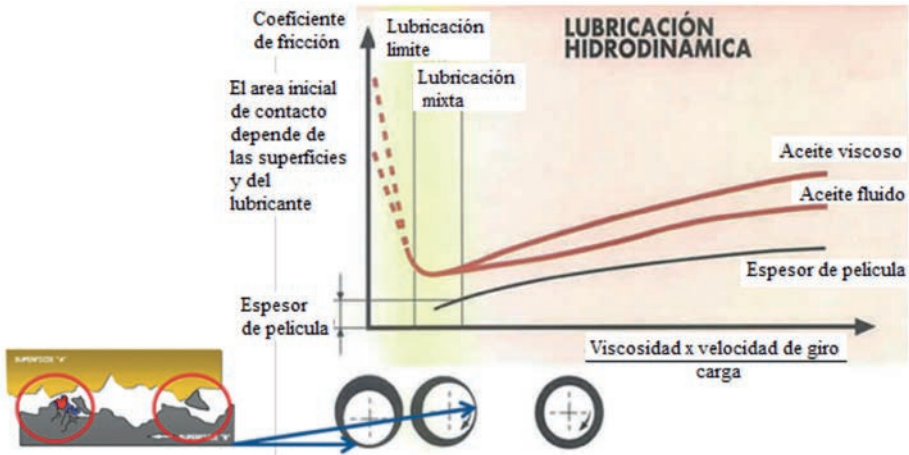
$$C_{lu} = \frac{\mu \times \omega}{q} \quad (25)$$

Donde

ω es la velocidad angular del conjunto

q es la carga que soporta el conjunto

Figura 156. Curva de Stribeck Tomado de [84]



Lubricación límite. Ocurre cuando la condición de lubricación C_{lu} (fórmula 25) toma un valor muy bajo, cercano a cero (viscosidad muy baja o velocidad de operación cercana a cero o carga que tiende a infinito). En esta condición la altura de las asperezas de la superficie es superior al espesor de la película de lubricante, razón por la cual aparte de haber muy alta fricción se propicia la aparición de *desgaste*. Adicionalmente, en esta región la carga (eje) es sostenida por el buje o anillo, y no por el lubricante.

Lubricación hidrodinámica. Ocurre cuando la condición de lubricación C_{lu} (fórmula 25) toma un valor tal que el espesor de la película de lubricante es superior a la altura de las asperezas de las superficies. Se forma una *cuña de lubricación* y la carga (eje) es sostenida por el lubricante. En estas condiciones la fricción y el desgaste deben ser mínimos si se ha elegido convenientemente el lubricante y su espesor de película.

Lubricación mixta. Esta región corresponde a un estado transitorio e intermedio entre la lubricación límite y la lubricación hidrodinámica. A momentos la carga será sostenida por el lubricante, y a momentos habrá contacto entre los cuerpos sólidos. Se espera que cuando el conjunto inicia la operación a velocidad cero, debe pasar por este estado, pero luego debe superarlo y quedar ubicado en lubricación hidrodinámica.

Por último, en la región derecha de la curva de *Stribeck*, se observa que lubricar con un fluido demasiado viscoso es contraproducente, porque aumenta el coeficiente de fricción.

10.2.7. Algunas siglas importantes a tener en cuenta

A.G.M.A.: *American Gear Manufacturing Association.*

A. P. I.: *American Petroleum Institute.*

A. S. T. M. : *American Society for Testing of Materials.*

D. O. T.: *Department Of Transportation.* EE UU.

I. S. O. : *International Standarization Organization.*

I.V.: Índice de viscosidad. Variación de la viscosidad que sufre un aceite, a medida que varía la temperatura.

N. L. G. I.: *Nacional Lubricating Grease Institute of America.*

S. A. E.: *Society Automobile Engineers.*

10.3. Propiedades generales de los lubricantes, clasificaciones y nomenclaturas

10.3.1. Propiedades y características generales de los lubricantes

Para comprender los lubricantes se deben atender propiedades y características tan variadas como origen, presentación, viscosidad, Índice de viscosidad, aditivaciones.

Origen. Los lubricantes pueden ser de origen animal, vegetal y mineral. Los lubricantes de origen animal fueron utilizados hasta bien entrado el siglo XX, pero su uso decayó con el auge de los aceites de base mineral, dadas las elevadas exigencias de los procesos cada vez más veloces y productivos. Actualmente se conocen unos pocos casos de uso de aceites de origen animal, como es el caso de la “vela de cebo”, muy aplicado como lubricante de corte de herramientas manuales o en mecanizados a bajas velocidades de corte. Los lubricantes de origen vegetal prácticamente están destinados a usos alimenticios. A nivel industrial y automotriz, los lubricantes más ampliamente utilizar son los de origen mineral y sus refinamientos (sintéticos).

Los lubricantes de origen mineral son un subproducto de la destilación del petróleo, y se subdividen en bases nafténicas (para lubricantes a bajas temperaturas y de baja viscosidad) y parafínicas (para lubricantes de alto índice de viscosidad).

Los lubricantes sintéticos toman como punto de partida una base mineral, e industrialmente se les efectúan elevadas aditivaciones (adición de sustancias que

mejoran las propiedades del lubricante). Los lubricantes sintéticos (Figura 158) se utilizan en condiciones especiales como:

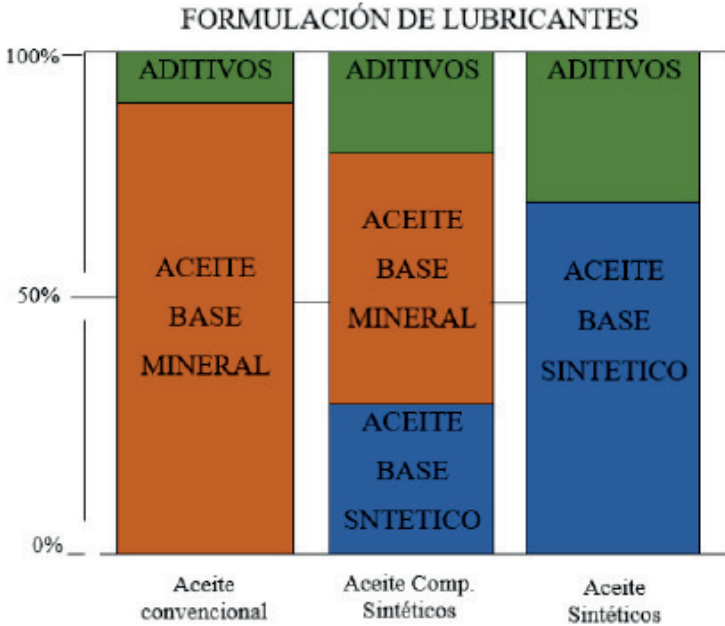
- Temperaturas extremas
- Exposición a cargas excesivas o contaminantes
- Histórico de paros excesivos por problemas mecánicos
- El equipo falla con lubricantes de base mineral
- Alto consumo de energía
- Consumo excesivo de partes (deterioro acelerado), como por ejemplo rodamientos
- El equipo es operado por encima de los parámetros de diseño del fabricante (OEM)
- Puntos de lubricación inaccesibles

Estado. Se refiere a la fase en la cual se encuentra el lubricante, y pueden ser:

- Líquidos, conocidos como aceites
- Reoplásticos, conocidos como grasas
- Sólidos a temperatura ambiente
- Niebla (aire + aceite)

En términos generales, los aceites constan de una base más unos aditivos o mejoradores de propiedades, mientras que las grasas están constituidas por un aceite base más unos aditivos y un espesante o jabón.

Figura 157. Formulación general de los lubricantes minerales, semi-sintéticos y sintéticos Tomado de [85]



Viscosidad. El concepto de viscosidad ya fue tratado previamente, y en este apartado se entenderá la viscosidad en relación con una clasificación (grado o número) dada por asociaciones y fabricantes, para su identificación. En el caso particular de la SAE (ver 10.2.7), ha hecho una clasificación basada en grados de viscosidad (ver numeral 10.3.2.3).

Índice de viscosidad. El Índice de Viscosidad, es un parámetro que muestra en una curva Viscosidad versus Temperatura (Figura 159), cómo varía la viscosidad de un aceite con respecto al incremento de temperatura. Los aceites monogrados presentan un IV de pendiente negativa muy acentuada, lo que en términos prácticos puede llevar a que la máquina/equipo funcione bien a bajas temperaturas, pero a elevadas temperaturas sufra daños debido al *excesivo adelgazamiento* del aceite. La pendiente de la curva IV de los aceites multigrados es menos negativa que la de los monogrados (ambos de base mineral).

Los aceites sintéticos a comparación de los minerales previenen mejor la formación de hollín, el consumo de aceite y por ende ahorran más en el consumo de combustible. (Figura 160).

Figura 158. Curva Viscosidad versus temperatura para (2) IV diferentes
Tomado de [86]

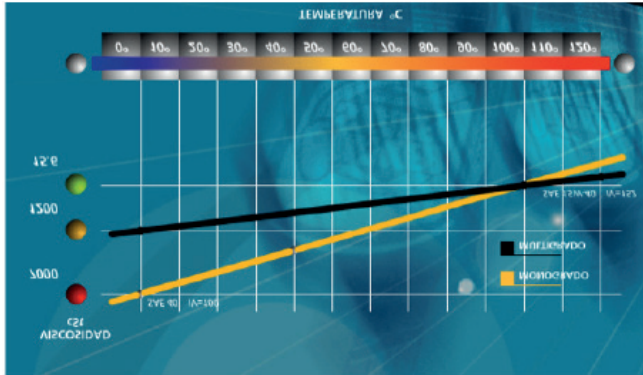
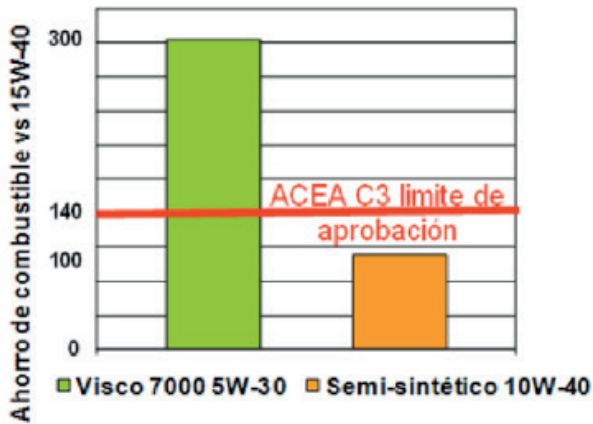


Figura 159. Ahorro de combustible de un aceite sintético frente a uno semisintético Tomado de [87]



Aditivos. Son sustancias químicas que se le adicionan a los lubricantes, con el objeto de mejorar propiedades específicas como por ejemplo la *Detergente*, asociada con limpiar las paredes por donde transita el lubricante y conducir la suciedad hasta donde pueda ser removida (filtro o colector). A continuación, se listan algunos de los principales aditivos utilizados en los lubricantes:

- Detergente
- Dispersante
- Antidesgaste
- Antioxidante
- Anticorrosivo
- Modificador de viscosidad
- Antiespumante
- Depresor punto fluidez
- Presión extrema

- Antioxidante
- Etc.

La aplicación específica del lubricante definirá el paquete de aditivos requerido. En términos generales los aceites para cárter de motor de combustión interna poseen más aditivos que los aceites de aplicación industrial, y dentro de los aceites para cárter, los paquetes de aditivos para motor a gasolina son diferentes a los de motor a diesel (diferente principio operativo, presiones y temperaturas de trabajo, etc.).

10.3.2. Clasificaciones y nomenclaturas de los aceites

Los aceites se pueden clasificar de acuerdo con:

- La aplicación
- El tipo de servicio
- La viscosidad

Clasificación de acuerdo con la aplicación. En este aspecto se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Uso Industrial
- Uso Automovilístico (cárter, engranajes, frenos)

En general, y como se verá más adelante, las especificaciones de los aceites automotrices son más elevadas que la de los industriales, esencialmente por las altas temperaturas a las que están sometidos los primeros, razón por la cual un aceite automotriz *podría* usarse en aplicaciones industriales, pero no al revés.

Clasificación A.P.I., de acuerdo con el servicio. Se reconocen dos tipos de servicio, asociados al principio operativo del motor al cual se aplique.

- SX, “S” de *Spark* (chispa), son los aceites de aplicación en el cárter de motores a gasolina. La clasificación incluye una segunda letra, que va indicando la evolución de las especificaciones con el paso del tiempo, es decir un nivel de calidad, actualmente dicha clasificación va en **SM**.
- CY, “C” de *Compression*, para cárter de motores a diesel. Al igual que en el caso anterior, la clasificación incluye una segunda letra, que va indicando la evolución de las especificaciones con el paso del tiempo, es decir un nivel de calidad, actualmente dicha clasificación va en **CI-4**.

Las tablas 36 y 37 presentan la evolución en el tiempo de los aceites S y C, y sus principales características.

Tabla 36. Evolución en el tiempo de los aceites para motor a gasolina
Tomado de [88]

Evolución API	Características
SA	Aceite sin aditivos, utilizados antes de la década del 1930. Obsoleta.
SB (1930)	Mínima protección antioxidante, anticorrosiva y antidesgaste. Obsoleta.
SC (1964)	Incorpora el control de depósitos a baja y alta temperatura. Obsoleta.
SD (1968)	Mayor protección que el nivel anterior respecto de la formación de depósitos, desgaste y corrosión. Obsoleta.
SE (1972)	Mayor protección contra la oxidación del aceite, depósitos de alta temperatura, herrumbre y corrosión. Obsoleta
SF (1980)	Mayor estabilidad a la oxidación y características antidesgaste. Obsoleta.
SG (1989)	Mejor control de la formación de depósitos, oxidación del aceite y desgaste. Obsoleta.
SH (1993)	Mejor protección respecto del nivel SG, fundamentalmente en el control de depósitos, oxidación del aceite, desgaste y corrosión. Estos aceites han sido aprobados siguiendo el "Código de Práctica" del CMA (<i>Chemical Manufacturers Association</i>).
SJ (1996)	Mejor control de la formación de depósitos, mejor fluidez a bajas temperaturas, mayor protección del motor a alto número de vueltas, menor consumo de combustible.
SL (2001)	Definida este año para ser mandataria en el 2002. Desarrollada para aceites con economía de combustibles, provee superior resistencia antioxidante a las altas temperaturas y al desgaste. Suple algunas falencias de SJ indicadas por fabricantes europeos (ACEA A2 y A3)
SM 2004	API SM fue adoptado para definir a los aceites destinados a los más modernos motores nafteros y también a los de generaciones anteriores, en aplicaciones típicas de automóviles para pasajeros. Vehículos deportivos de todo terreno-SUV, vans y camionetas, operando bajo las recomendaciones de mantenimiento de los fabricantes. API SM es superior a API SL en aspectos tales como: Economía de Combustible, Bombeabilidad del aceite usado, Control del espesamiento debido a la Oxidación y la Nitración y los depósitos a alta temperatura, y en especial en cuanto al consumo de aceite y protección de los Sistemas de Control de emisiones.

Tabla 37. Evolución en el tiempo de los aceites para motor a diesel
Tomado de [88]

Evolución API	Características
CA (1940)	Motores de aspiración natural. Protección mínima contra la corrosión, desgaste y depósitos. Obsoleta.
CB (1949)	Motores de aspiración natural. Mejor control sobre los depósitos y el desgaste. Obsoleta.
CC (1955)	Motores de aspiración natural, turbo o sobrealimentados. Mayor control sobre la formación de depósitos a alta temperatura y corrosión en cojinetes. Obsoleta.
CD (1955)	Motores de aspiración natural, turbo o sobrealimentados que requieren un mayor y efectivo control de los depósitos y el desgaste. Serie 3 clásicas. Obsoleta.
CD-II (1961)	Motores diesel de dos tiempos que requieren un efectivo control del desgaste y los depósitos (estos aceites cumplen todos los requerimientos del nivel CD). Obsoleta.
CE (1983)	Motores turbo o sobrealimentados para servicio severo. Control sobre consumo y espesamiento del aceite, depósitos y desgaste. Dirigida a multigrados. Obsoleta.
CF-4 (1990)	Motores turbo o sobrealimentados para servicio severo, especialmente en carretera. Reemplaza al nivel CE con mejor control del consumo de aceite y formación de depósitos en los pistones
CF (1994)	Motores de aspiración natural, turbo o sobrealimentados, que pueden usar gasoil con diferentes contenidos de azufre. Efectivo control de la formación de depósitos en los pistones, desgaste y corrosión en cojinetes. Reemplaza al nivel CD. No necesariamente cumple los requerimientos de los niveles CF o CF-4.
CG-4 (1994)	Motores diesel para servicio severo, tanto en carreteras (gasoil con bajo contenido de azufre: 0,05% p.) como fuera de ellas (gasoil con contenido de azufre máximo de 0,5% p.). Efectivo control de los depósitos de alta temperatura, desgaste, corrosión, espuma, oxidación del aceite y acumulación de hollín. Diseñado para cumplir con las normas sobre emisiones de 1994. También se puede emplear cuando se requieran aceites de nivel CD, CE y algunos casos de CF-4. Se suele acompañar con CF-4 y normas Mercedes Benz.
CH-4 (1998)	Motores diesel para servicio severo, que emplean gas oil con alto o bajo contenido de azufre, y que deben cumplir con estrictas normas de control de emisiones (USA 1998). Ha mejorado el control de depósitos en modernos pistones de dos piezas (excelente nivel dispersante), del desgaste y la resistencia a la oxidación. Sobresaliente control del hollín que producen los sistemas de inyección de alta presión y control electrónico.
CI-4	Comparada con CH-4, estos aceites brindan una mayor protección contra la oxidación, herrumbre, reducción del desgaste y mejora la estabilidad de la viscosidad debido a un mayor control del hollín formado durante el uso del aceite, mejorando así el consumo de aceite

Clasificación de acuerdo con la viscosidad. La SAE creó una clasificación de los aceites para cárter y engranajes, con base a su viscosidad, representada en grados SAE. En los grados SAE se distingue un número que representa la viscosidad en diferentes condiciones (Tablas 38 y 39) y en algunos casos aparece la letra “W”, que indica *Winter* (invierno), es decir, estos son los aceites, que se deben usar en invierno para evitar que la temperatura ambiente sea inferior a la del punto de fluidez del aceite imposibilitando el bombeo del aceite.

En el caso de aplicaciones automotrices se distinguen los aceites *monogrados* y los *multigrados*. Los *monogrados* o de una sola estación están formados por un solo grado SAE, acarreaban la consecuencia de que dependiendo de la estación debía utilizarse uno para invierno o uno para verano, por ejemplo, SAE 50 es solo para verano, y el SAE 20W es para invierno. Para subsanar el problema anterior se crearon los aceites *multigrados*, es decir, aceites que combinan dos grados SAE de viscosidad, con el fin de obtener un espectro de temperaturas de operación más amplio que el permitido por un *monogrado*. Ejemplos: SAE 20W50 SL, 15W40 CI 4.

- Clasificación SAE para cárter de motor

Los grados de viscosidad SAE para cárter van desde el SAE 0W hasta el SAE 60 y las viscosidades de referencia se miden a 40°C y a 100°C, tal como lo muestra la tabla 36.

Tabla 38. Grados SAE de viscosidad para aceites de motor
Tomado de [89]

Clasificación de viscosidades en aceites para motor, según norma SAE J300 diciembre de 1999					
	Grado viscosidad SAE	Viscosidad Máx (cP) a T(°C)	Viscosidad bombeo (cP) Max a T(°C)	Viscosidad Dinámica (cSt) a 100 °C	HT/HS AT/AC Visc. (cSt) a 150 °C
Viscosidad a baja temperatura (winter)	0W	6200 @ -35	60000 @ -40	3,8	---
	5W	6600 @ -30	60000 @ -35	3,8	---
	10W	7000 @ -25	60000 @ -30	4,1	---
	15W	7000 @ -20	60000 @ -25	5,6	---
	20W	9500 @ -15	60000 @ -20	5,6	---
	25W	13000 @ -10	60000 @ -15	9,3	---
Viscosidad a alta temperatura (Verano)	20	---	---	5,6 a 9,3	2,6
	30	---	---	9,3 a 12,5	2,9
	40	---	---	12,5 a 16,3	2,9*
	40	---	---	12,5 a 16,3	3,7**
	50	---	---	16,3 a 21,9	3,7
	60	---	---	21,9 a 16,1	3,7

Referencia: (*) Para los grados 0W-40, 5W-40 y 10W-40

(**) Para los grados 15W-40, 20W-40, 25W-40 y 40

- Clasificación SAE para engranajes

Al igual que los aceites para cárter, esta clasificación se basa también Grados SAE, con dos particularidades: Se identifican con la letra **G** de *Gear* (engranaje) y van desde el grado SAE 70 hasta el grado SAE 250. La tabla 37 presenta la clasificación de servicio según la API, y sus principales características.

Tabla 39. Clasificación API para transmisiones automotrices. Tomado de [90]

Clasificación SAE J306	Tipo de servicio	Características
GL - 1	Engranajes cilíndricos y cónicos de dientes rectos y helicoidales con cargas ligeras y uniformes	Lubricantes sin aditivos, que pueden tener o no antioxidantes y antiespuma
GL- 2	Engranajes, tornillos sin fin y corona quetrabajan en condiciones severas de cargas.	Contiene aditivos de antidesgaste o de untuosidad.
GL - 3	Cajas de cambio y diferenciales con engranajes cónicos bajo condiciones moderadamente severas.	Proveen aditivos antidesgaste.
GL - 4	Diferenciales con engranajes hipoidales en general.	Satisfacen norma: MIL-L-2105
GL - 5	Diferenciales con engranajes hipoidales sometidos a cargas variables. Elevada E.P.	Satisfacen norma: MIL-L-2105-D
GL - 6	Diferenciales hipoidales con grandes distancias entre ejes de la corona y del piñón. Obsoleta.	Cumplían norma: FORD ESW M2 C.105 A

Algunos ejemplos de especificaciones SAE para engranajes son: SAE 75W90 GL-4, SAE 80W90 GL-4, SAE 80W90 GL-5, SAE 80W140 GL-5, etc.

Puesto que en el mercado se consiguen múltiples marcas y calidades de aceites, algunas de dudosa procedencia, una forma de diferenciar un producto bueno de uno dudoso es porque en el estuche se observe la *donut* o símbolo de servicio API (Figura 161). Dejan muchas dudas e inquietudes los aceites cuya nomenclatura no aparezca completa, acorde con lineamientos anteriores, o que en el tipo de servicio informe que sirva para S y para C. Es necesario recordar además que de una nomenclatura se puede obtener mucha información.

Figura 160. Presentación de aceites de buena calidad y procedencia
Tomado de [91]



- Clasificación ISO

Clasifica los aceites con base en el grado de viscosidad cinemática a 40°C. Esta clasificación es exclusiva para los aceites industriales. La tabla 40 presenta un listado de aceites grado ISO, con sus respectivas viscosidades cinemáticas máximas y mínimas, a la temperatura de referencia de 40°C.

Tabla 40. Viscosidades cinemáticas para diferentes grados ISO
Tomado de [92]

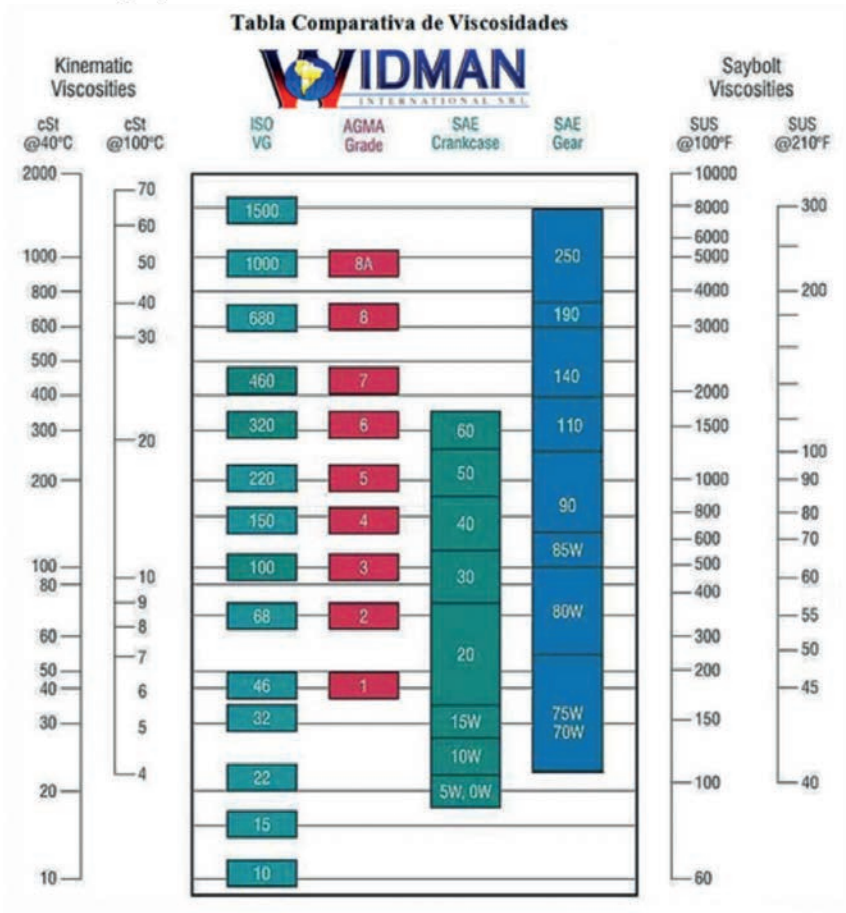
Grado ISO	Límites de viscosidad					
	cSt/40°C		SSU/100°F		SSU/210°F	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
2	1,98	2,42	32,8	34,4		
3	2,88	3,52	36,0	38,2		
5	4,14	5,06	40,4	43,5		
7	6,12	7,48	47,2	52,0		
10	9,00	11,00	57,6	65,3	34,6	35,7
15	13,50	16,50	75,8	89,1	37,0	38,3
22	19,80	24,20	105,0	126,0	39,7	41,4
32	28,80	35,20	149,0	182,0	43,0	45,0
46	41,40	50,60	214,0	262,0	47,1	49,9
68	61,20	74,80	317,0	389,0	52,9	56,9
100	90,00	110,00	469,0	575,0	61,2	66,9
150	135,00	165,00	709,0	871,0	73,8	81,9
220	198,00	242,00	1047,0	1283,0	90,4	101,0
320	288,0	352,00	1533,0	1881,0	112,0	126,0
460	414,00	506,00	2214,0	2719,0	139,0	158
680	612,00	748,00	3298,0	4048,0	178,0	202,0
1000	900,00	1100,00	4864,0	5975,0	226,0	256,0
1500	1350,00	1650,00	7865,0	9079,0	291,0	331,0

- Clasificación AGMA

Se refiere a una clasificación de lubricantes para engranajes industriales elaborada por la AGMA (ver numeral 10.2.7), la cual va del 1 al 8, correspondiendo a cada número un rango de viscosidades expresadas en SSU (*Saybolt Second Universal*) a 100°F, o en cSt a 40°C. La Figura 162 presenta una comparación gráfica de viscosidades de los aceites en diferentes clasificaciones (SAE para cárter, SAE para engranajes, AGMA, ISO).

Atención: Los aditivos de los aceites para motor diesel, a gasolina o para engranajes son diferentes, por lo tanto, así dos aceites posean la misma viscosidad no se pueden intercambiar indistintamente.

Figura 161. Comparación de viscosidades de aceites, de acuerdo a varias normas y aplicaciones Tomado de [93]



A continuación, se presentan algunos ejemplos de nomenclatura completa de aceites, y del significado de cada término:

Ejemplo 1: SAE 75W90 GL-4. Las letras SAE indican que se trata de un aceite para aplicación automotriz. El 75W90 indica que es un aceite multigrado (combinación de 75W invierno y 90 verano). Puesto que el grado 75W es superior al 25W y al SAE 60 (Tabla 38), tomados como límites en invierno y verano para los aceites para cárter, quiere decir que es un aceite para engranaje o *Gear*. Por último, el GL-4, indica *Gear Lubricating* con tipo de servicio 4, es decir, apto para diferenciales con engranajes hipoidales en general (Tabla 39).

Ejemplo 2: SAE 20W50 SL. Las letras SAE indican que se trata de un aceite para aplicación automotriz. El 20W50 indica que es un aceite multigrado (combinación de 20W invierno y 50 verano). Puesto que el grado 20W es inferior al 25W y al SAE 60 (Tabla 38), tomados como límites en invierno y verano para los aceites para cárter, quiere decir que es un aceite para cárter. Por último, del término SL, S indica que es un servicio para cárter de motor y la L, indica que pertenece a la evolución del año 2001 (Tabla 36).

Ejemplo 3: Aceite ISO VG 32, indica que dicho aceite es de uso industrial, y su viscosidad cinemática a 40°C es de 32 cSt, el término VG quiere decir *Viscosity Grade*. Si se desea conocer si la aplicación es para sistema neumático o hidráulico es necesario consultar el manual del fabricante; en este caso específico se aplica en sistemas hidráulicas de alta presión.

10.3.3. Clasificaciones y nomenclaturas de las grasas

Una grasa es un aceite espesado con el fin de lograr su permanencia por períodos largos de tiempo. Estructuralmente una grasa se compone de una base de jabón metálico (espesante) + aceite lubricante + aditivo.

Las grasas se aplican en:

- Mecanismos no adecuados para retener aceite, donde por gravedad se deslizan (Ejemplo guías de desplazamiento de una puerta cortina).
- Mecanismos expuestos al polvo o a la intemperie.
- Superficies ásperas o sometidas a choques y vibraciones.
- Mecanismos de difícil acceso, donde el lubricante debe permanecer en servicio bastante tiempo.

Las grasas presentan un defecto sistémico, consistente en su corrimiento o desplazamiento por la acción del elemento móvil, una vez que ha lubricado la primera vez. Es necesario verificar que la aplicación de lubricación con grasa pertinente y de subsanar el problema del corrimiento, bien sea con relubricaciones o con algún dispositivo interno que reubique la grasa desplazada.

Al analizar una grasa, es necesario conocer las propiedades del aceite base (viscosidad), del espesante o jabón y las aditivaciones. Mirando la grasa como un conjunto, las propiedades con las cuales se caracteriza de manera preponderante son la *consistencia* o *grado de penetración*, el tipo de jabón o espesante y el *punto de goteo* o *escurrimiento*.

La *consistencia* o *penetración* es la profundidad que un penetrómetro (plomada) alcanza en la grasa, al dejarlo caer sobre ella durante 5 segundos; el ensayo de consistencia o penetración es un ensayo normalizado bajo normas ASTM. La tabla 41 presenta las consistencias normalizadas (desde 000 hasta extradura) y las respectivas profundidades.

Tabla 41. Consistencias normalizadas para grasas. Tomado de [94]

Clasificación N.L.G.I.	Grado de consistencia	Penetración ASTM (décimas de mm)	Aspecto
000	Semi-líquida	445/475	Muy fluida
00		400/430	Semifluida
0	Semi-fluida	335/385	Blanda
1	Muy blanda	310/340	Semiblanda
2	Blanda	265/295	Multipropósito
3	Mediana	210/250	Semidura
4	Dura	175/205	Dura
5	Muy dura	130/160	Muy dura
6	Extradura	85/115	Bloque

Desde el punto de vista de los jabones o espesantes (Tabla 41), las grasas se clasifican en simples y mixtas:

Simple. Usan un solo jabón.

- Calcio - Sodio - Aluminio - **Litio** (muy usada).

Mixtas. Tiene dos jabones combinados.

- Sodio y Aluminio - Litio y Calcio

El *punto de goteo* o *escurrimiento* es la temperatura a la cual la grasa se degrada y fluye como si fuera un aceite (se separa el jabón del aceite), y así se enfría ya no recupera su condición de grasa. La Tabla 42 presenta algunos valores de punto de goteo, asociados al tipo de jabón. Los valores de referencia mostrados pueden variar dependiendo del fabricante.

Tabla 42. Tipos de jabón o espesante, punto de goteos y otras propiedades asociadas. Tomado de [94]

Características	Metal de Jabón			
	Sodio	Litio	Calcio	Aluminio
Punto de goteo (°C)	120/180	180/200	100	100
Textura	Lisa-fibrosa	Lisa	Lisa	Lisa
Resistencia al calor	Buena	Muy buena	mediana	Mediana
Resistencia a los Esfuerzos mecánicos	Buena	Muy buena	Hasta 70°	Mediana
Resistencia al agua	Poca	Buena	Buena	Buena
Resistencia a bajas T.	Mediana	Muy buena	Mala	Mediana

Los aditivos principales que se le aplican a las grasas son los siguientes:

- Antidesgaste
- Antioxidante
- Anticorrosivo
- Anti-herrumbre
- Presión extrema
- Etc.

Otras propiedades de las grasas son: Extrema presión, resistencia al lavado, resistencia a la corrosión, estabilidad mecánica, compatibilidad (entre grasas y con sellos, retenedores y empaques), textura.

Compatibilidad de las grasas. Las grasas no pueden mezclarse indiscriminadamente, puesto que pueden no prestar el efecto lubricante adecuado. La tabla 43 presenta un listado de compatibilidades.

En la nomenclatura de las presentaciones comerciales de las grasas, regularmente se indica el tipo de jabón y un número n° que está asociado a la consistencia o penetración. Ejemplo, grasa de Litio n° 3. Las propiedades del aceite base regularmente no están explícitas en los estuches y hay consultarlas en el catálogo del fabricante.

Tabla 43. Tabla de compatibilidades para tener en cuenta al mezclar grasas de diferente jabón. Tomado de [94]

	Metal de Jabón				
	Calcio	Complejo de Calcio	Arcilla	Litio	Complejo de Litio
Calcio	Sí	No	No	No	No
Complejo de Calcio	No	Sí	No	No	No
Arcilla	No	No	Sí	No	No
Litio	No	No	No	Sí	Sí
Complejo de Litio	No	No	No	Sí	Sí

10.3.4. Clasificaciones y nomenclaturas de los líquidos de frenos

Los líquidos de frenos son un tipo particular de aceite lubricante, de baja viscosidad cinemática y altos puntos de ebullición seco y húmedo (Tabla 44). La razón de ser de la baja viscosidad cinemática es porque el fluido debe admitir cierta compresibilidad para un funcionamiento suave y seguro (si el fluido fuese de alta viscosidad el frenado sería muy efectivo pero muy brusco); la razón de ser de las altas temperaturas de ebullición es para evitar sobrecalentamientos e incendios debido al inevitable calentamiento del sistema (bandas, pastillas, cilindros, mangueras, etc.). Los fluidos de frenos están normalizados por el DOT y por la SAE. De manera similar a las grasas, hay que tener precaución con las mezclas de líquidos de frenos, puesto que pueden llegar a inflamarse. Se debe consultar acerca de su mezcla.

10.4. Aspectos relativos al proceso de lubricación

Como se mencionó previamente, la función **primaria** de un lubricante es la de **lubricar**, pero hay otras funciones secundarias, también importantes para la preservación de los sistemas:

- Enfriar. Servir de agente transmisor de calor
- Limpiar. Evitar la acumulación de lodos dentro de un sistema y llevarlos hasta un sitio donde se puedan remover fácilmente (filtros)
- Sellar. Principalmente en los motores de combustión interna)
- Proteger. Evitar el contacto metal-metal de las dos superficies a lubricar.

En la Lubricación hay cinco aspectos generales a tener en cuenta:

- La forma y calidad adecuada de lubricante (**producto adecuado**). *Numeral 10.3*

- Ni mucho ni muy poco (**cantidad adecuada**)
- **En el sitio adecuado**
- Ni antes ni después (**momento adecuado**)
- **Método de aplicación adecuado** al sistema a lubricar

Tabla 44. Tabla de propiedades de líquidos de frenos comerciales
Tomado de [95]

	Aplicación	Características principales
DOT 2	OBSOLETO	
DOT 3	Frenos a disco y/o tambor de todo tipo de vehículo	P.E. 210°C; P.E.H. 144°C; v(100°C) 1,7; PH 9
DOT 4	para vehículos con frenos ABS	P.E. 235°C, P.E.H. 160°C, v(100°C) 2,8, PH 8
DOT 5	Sistemas de frenado y embragues hidráulicos en vehículos y motocicletas modernos y de muy altas prestaciones	P.E. 265°C; P.E.H. 180°C; v(100°C) 2,2; PH 8
DOT 5.1	Sistemas de frenado en condiciones muy severas	P.E. 275°C; P.E.H. 196°C; v(100°C) 2,8; PH 8

10.4.1. Cantidad adecuada

Por lo regular, a cada máquina/equipo que deba ser lubricado el fabricante le asigna por catálogo o manual la calidad y cantidad adecuada que se debe aplicar. Tanto lubricar en exceso como en defecto acarrea consecuencias negativas, la tabla 45 presenta un resumen de las consecuencias en cada caso. Algunas técnicas generales para verificar el nivel de aceite de máquinas/equipos son:

- Mirillas o tapones de rebose, para el caso de cárteres (o depósitos).
- Varillas medidoras de nivel, para el caso de motores de combustión interna o depósitos de direcciones hidráulicas.
- Simple inspección visual en depósitos de acrílico o vidrio.

Tabla 45. Consecuencias de lubricar en exceso y en defecto.

Clasificación	Efecto	Comentario
1	1 / 10 000	Remota probabilidad de ocurrencia; irrazonable esperar que la falla pueda ocurrir.
2	1 / 5000	Baja razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron bajas razones de falla para ciertos volúmenes/cargas.
3	1 / 2 000	Baja razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron bajas razones de falla para ciertos volúmenes/cargas.
4	1 / 1 000	Razón de falla ocasional. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron similares razones de falla para ciertos volúmenes/cargas
5	1 / 500	Moderada razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron moderadas razones de falla para ciertos volúmenes/cargas.
6	1 / 200	Moderada a alta razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron moderadas razones de falla para ciertos volúmenes/cargas.
7	1 / 100	Alta razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron altas razones de falla, que causaron problemas.
8	1 / 50	Alta razón de falla. Similar a los diseños que, en el pasado, tuvieron altas razones de falla, que causaron problemas.
9	1 / 20	Muy alta razón de falla. Mucha certeza de causar problemas.
10	1 / 10+	Muy alta razón de falla. Mucha certeza de causar problemas.

Existen casos especiales en los cuales no es tan simple la determinación de la cantidad de lubricante a aplicar, como por ejemplo los rodamientos. A continuación, se describe un procedimiento general para ello.

Aplicación práctica de lubricación en rodamientos:

Los rodamientos pueden lubricarse en baño de aceite o con grasa. Cuando se lubrican en baño de aceite no poseen sellos. Cuando se lubrican con grasa poseen por lo regular sellos, los cuales pueden ser polímeros o metálicos. Si los sellos son poliméricos la grasa no debe cambiarse, ya que están diseñados para que trabajen una determinada vida útil, al final de la cual el elemento se desecha sin relubricarse. Si por el contrario los sellos son metálicos, estos son desmontables y la cantidad de grasa a incorporar está dada por la fórmula 26.

$$G = 0,005 \times D \times B \tag{26}$$

Donde

- G es la cantidad de grasa (en g) a relubricar;
- D es el diámetro exterior del rodamiento (mm);
- B es el ancho del rodamiento (mm);

Una vez conocida la cantidad de grasa (g), con la engrasadora que se vaya a utilizar se debe determinar los g de grasa que evacua por pistolazo, y con base en ello determinar el número de pistolazos.

10.4.2. Momento adecuado

Un lubricante se cambia por dos razones principales:

- **Contaminación excesiva:** Materiales o partículas indeseables que afectan el funcionamiento del aceite.
- **Degradación del aceite:** por descomposición química de los constituyentes del aceite, bases o aditivos.

Por lo regular, los fabricantes de los equipos especifican unos lineamientos generales para el recambio de los aceites y filtros, los cuales pueden estar basados en distancia recorrida (km o millas), horas reales trabajadas, tiempo transcurrido o con base en los resultados de algunos criterios de inspección. En cualquier caso, las recomendaciones de fabricante pueden ser modificadas dependiendo de condiciones extremas de trabajo o ambientales.

Una forma alternativa de validar la conveniencia de modificar las frecuencias recomendadas por los fabricantes de los equipos es haciendo uso de la técnica de Mantenimiento Predictivo PdM *Análisis de aceites en uso* (ver numeral 4.6), en la cual al finalizar el período normal del uso del aceite se toma una muestra de aceite, se envía a laboratorio, donde principalmente se analizan contenidos de contaminantes y metales, se mide la viscosidad y con base en los resultados se define la conveniencia de acortar o alargar la frecuencia de recambio.

10.4.3 Sistemas o métodos de lubricación

Se tratará aquí sobre los dispositivos que suministran el lubricante adecuado, en el lugar, cantidad y momento precisos. Varían desde lubricación manual hasta sistemas centralizados muy complejos. Las máquinas cada vez más veloces, costosas, confiables, de mayor exactitud y precisión, exigen cambios continuos en las prácticas de lubricación en las plantas.

Esencialmente, hay dos métodos de dosificación de la lubricación:

- Pérdida total
- Sin pérdida (circulatorios)

Pérdida total. Como su nombre lo indica, el lubricante se pierde prácticamente con un primer uso. Se utiliza en elementos poco cargados y que usan pocos volúmenes

de lubricante. Se subdivide en:

- Lubricación manual
- Por goteo
- Por niebla
- Centralizados

Manual con brocha. Se usa generalmente para lubricar las transmisiones por cadena o engranajes de muy baja velocidad de operación, y que se encuentran expuestos al ambiente. Previo proceso de lavado de la cadena (si está expuesta al polvo), se aplica con brocha el aceite, mientras la cadena esté en operación.

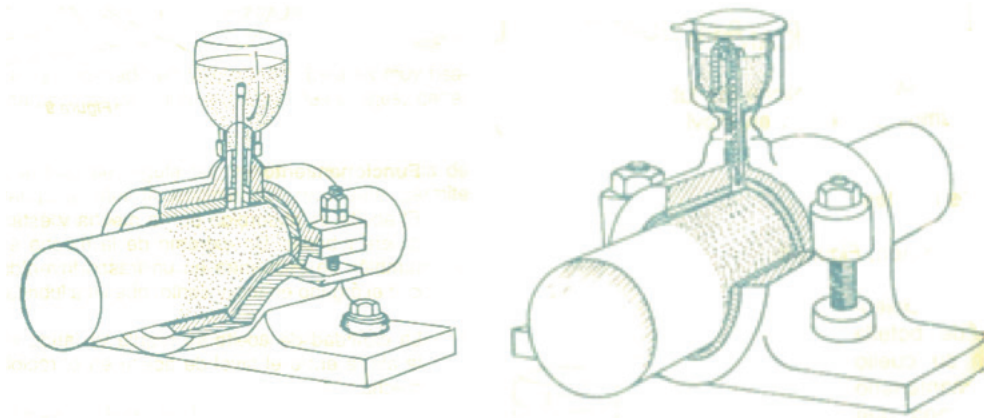
Por goteo manual. Se hace uso de una aceitera para lubricar un número reducido de puntos de equipos regularmente no industriales, ejemplo lubricación de las bisagras de las puertas.

Con espátula (manual para grasa). Se usa en superficies de fácil acceso, ejemplo las guías de las puertas de cortina.

Con inyectora manual o neumática de grasa. Se usa cuando la grasa debe penetrar a partes reducidas y de difícil acceso. Se usa una inyectora de grasa y una “grasera”, la cual es un pequeño accesorio que conduce la grasa hacia su destino y se “cierra” al ambiente una vez inyectada la grasa, para evitar la contaminación con polvo y agua.

Por goteo (semiautomático). Comúnmente usado para lubricar cojinetes o chumaceras. Se hace uso de pequeño depósito de aceite (Figura 163, sin vacío y con vacío), del cual va goteando a las superficies de interés. El aceite se irá “consumiendo” y un operario deberá estar pendiente de reponer el nivel de líquido.

Figura 162. Sistema de lubricación a pérdida total por goteo
Tomado de [96]

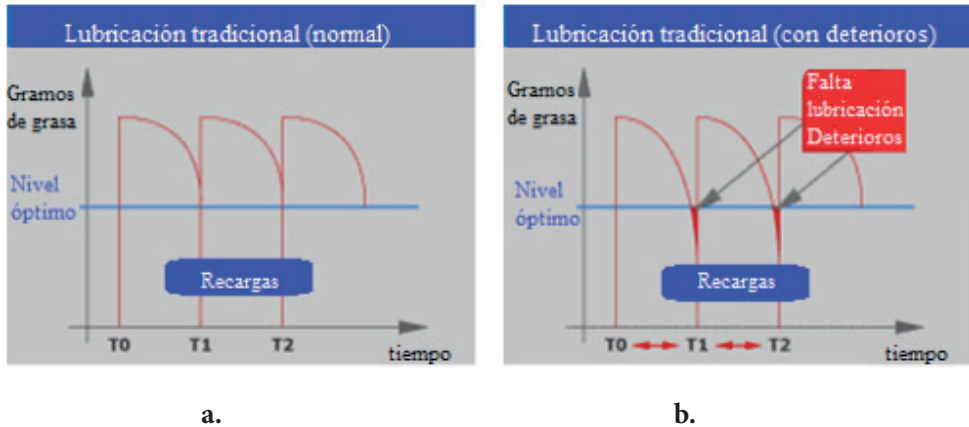


Los sistemas de pérdida total anteriores pertenecen a un grupo llamado **Lubricación Tradicional Normal**, es decir, se mantiene lubricada una máquina con el nivel de lubricante por encima del nivel *adecuado*, vía recargas temporales realizadas por la persona encargada de la lubricación; de esta manera, el operario cumple con un programa de lubricación y cada determinados períodos de tiempo realiza la recarga del lubricante que se consumió durante el funcionamiento normal de la máquina, tal como se ilustra en la Figura 164.a.

A pesar de la sencillez y la economía, los métodos tradicionales poseen varios inconvenientes:

- Si el operador se olvida de efectuar las recargas o si el vaso se rompe, se infringirán daños al componente.
- Colateral a lo anterior no hay forma de evidenciar que el lubricador cumplió su labor, a menos que se confíe en su palabra o se supervise directamente en sitio.
- Por otro lado, y como lo muestra la Figura 164.b, hay unos cortos períodos de tiempo en los cuales de manera sistémica el componente se queda sin lubricación, generándose un desgaste paulatino.

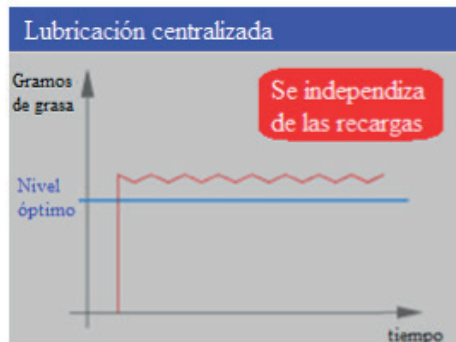
Figura 163. Comportamiento en el tiempo de los sistemas de lubricación tradicional normal. Tomado de [97]



Para obviar la problemática anterior surgieron los Sistemas de Lubricación Centralizados S.L.C., en los cuales, desde un depósito central y de manera automática, se distribuye y dosifica la cantidad de lubricante que requieren los diferentes componentes, en la cantidad adecuada, en el momento adecuado, disminuyendo al mínimo la dependencia de la mano del Hombre.

Los sistemas centralizados regularmente obedecen a la estructura de un sistema mecatrónico (numeral 9.3) y poseen la ventaja adicional que pueden adaptarse a aplicaciones telemáticas, ser operados o supervisados a distancia desde un software de gestión de lubricación. La Figura 165 ilustra el comportamiento de un sistema centralizado de lubricación.

Figura 164. Comportamiento en el tiempo de un sistema de lubricación centralizado. Tomado de [97]



Con los S.L.C., se puede lubricar grasa, aceite o con baño de niebla, y genéricamente el sistema está constituido por:

- Depósito central de lubricante
- Sistema de bombeo (*semiautomático o automático*).
- Sistema de distribución. Tuberías (pipe) y mangueras (*tubing*)
- Sistema de aplicación y dosificación

El funcionamiento de estos sistemas se caracteriza por mantener el nivel *adecuado* de lubricante realizando recargas automáticas en períodos de tiempo cortos; de esta manera la máquina recibe muy frecuentemente pequeñas dosis de lubricante. Estas pequeñas dosis hacen que el lubricante esté siempre renovado, libre de impurezas. Los S.L.C. se utilizan en sitios de difícil acceso, donde hay muchos puntos de lubricación, muchos puntos que usan el mismo aceite o grasa, en maquinaria sofisticada o costosa.

Beneficios de los S.L.C.

- Maximiza la producción, la eficiencia y la rentabilidad al reducir los paros no programados de maquinaria crítica.
- Seguridad, eliminando actividades de lubricación manual en zonas peligrosas, confinadas y/o en alturas.
- Ecología, disminuyendo problemas ambientales por derrames asociados con la lubricación manual tradicional.
- Triboeficiencia Energética, reduciendo la fricción y temperatura de cojinetes.
- Calidad, aplicación precisa y continua del lubricante limpio a cada uno de los puntos a lubricar desde un sistema central
- Confiabilidad y Disponibilidad de la maquinaria por una Lubricación confiable.
- Coadyuva en la Implementación de Programas Preventivos y Proactivos.
- Protección al lubricante de la contaminación al contar con un sistema cerrado preservado, y con el mínimo de manipulación por la mano del Hombre
- Ahorro de lubricantes por racionalización de su uso.

- Disminución de los tiempos de parada de equipos mejorando la productividad.
- Racionalización de la mano de obra de Mantenimiento.
- Permite lubricación con equipo en funcionamiento. De hecho, solo lubrica si la máquina/equipo está en operación.

Sistema centralizado por niebla (S.L.C. a pérdida total). Una corriente de aire toma el aceite de un depósito por principio Venturi, distribuyéndolo finamente en la corriente de aire, lo transporta y aplica en el punto de fricción (Figura 166). Usado principalmente en sistemas de rodamientos de alta velocidad, donde la lubricación con grasa y por circulación se hace ineficiente (calentamiento excesivo, pérdida de estanqueidad). Tiene como ventajas que puede lubricar aceites muy viscosos y provee buen enfriamiento, pero es contaminante del medio ambiente.

Sistema de Lubricación centralizada para aceite o grasa (S.L.C. a pérdida total). De manera análoga al sistema por niebla, desde un depósito central distribuye y dosifica la cantidad de aceite o grasa que requieren los diferentes equipos integrados, en la cantidad adecuada, en el momento adecuado. La Figura 167 muestra el ejemplo de un S.L.C. en un torno CNC.

Figura 165. Sistema de lubricación a pérdida total por niebla. Tomado de [98]

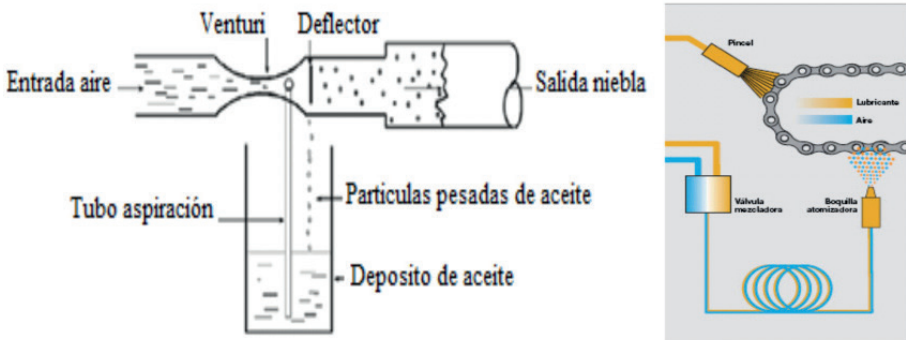


Figura 166. Sistema de lubricación centralizado aplicado en torno CNC
Tomado de [97]



Torno CNC, lubricado con Sistema Única línea de aceite, compuesto por bomba eléctrica comandada por el tablero del equipo a lubricar, y dosificadores que alimentan aprox. 30 puntos de lubricación

2. Sin pérdida o circulatorios. A diferencia de los métodos anteriores, el lubricante (aceite o grasa) permanece confinado en un depósito o cárter, y cuando el componente se encuentra en operación, es obligado a circular lubricando, y recogiendo impurezas. Se aplican en sistemas costosos y críticos, de trabajo permanente, con elevadas cargas.

Se subdividen en:

- Lubricación por gravedad o baño
- Lubricación por salpique
- Lubricación por circulación
 - Por gravedad.
 - Por presión.
 - Centralizado por presión.
- Combinados

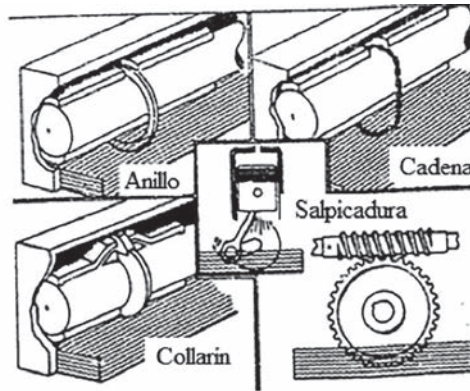
Por baño o gravedad. El sistema está constituido por un cárter, por una bomba que hace fluir el aceite desde el cárter hasta un depósito superior, desde donde por una serie de conductos el aceite llega sin presión hasta los diferentes mecanismos. Ejemplo, lubricación de mazas bagaceras, lubricación de los trenes divisor y diferencial de una generadora de engranajes.

Por salpique (Figura 168). Se emplea solamente en la lubricación de mecanismos cerrados tales como engranajes de reductores de velocidad, cajas de velocidades y cojinetes de rodamientos. Se dispone de un cárter y uno o varios de los mecanismos (árbol, collarín, cadena, anillo) permanecen sumergidos parcialmente en el aceite, de forma que cuando se ponga en rotación “arrastre” y “salpique” el aceite a los diferentes que conforman el sistema. Una vez lubrique el aceite, caerá por gravedad al cárter y continuará el ciclo.

Por presión. En este caso, hay un depósito de aceite (cárter) y un sistema de bombeo conformado por colector, filtro, bomba y conductos de lubricación. Este sistema es usado en los motores de combustión interna y en compresores de tamaños medianos y grandes. Ventajas de los sistemas por presión:

- Proveen la cantidad de aceite suficiente para lubricar y refrigerar
- Evacuan el polvo y otras sustancias contaminantes de los elementos lubricados
- El consumo de aceite es mínimo y con un sistema de filtración adecuado logran mayor tiempo de servicio del aceite
- Es automático y muy confiable
- Su única desventaja es su alto costo inicial, el cual está incluido en la compra de la máquina/equipo.

Figura 167. Algunas aplicaciones típicas de lubricación por salpique
Tomado de [96]



Combinados. Como es el caso de los MCI y Compresores, donde prima la lubricación a presión, pero también hay lubricación por salpique para lubricar las camisas y lubricación por gravedad.

10.4.4. Campo de aplicación de los métodos de lubricación

Las tablas 46 y 47 presentan un condensado del campo de aplicación de los diferentes métodos de lubricación vistos en 10.4.4.1 y 10.4.4.2.

10.4.5. Aspectos prácticos de la lubricación: seleccionar, operar y mantener

Se presenta una serie de recomendaciones relativas a los aspectos mencionados.

Seleccionar:

1. Elegir la viscosidad adecuada de acuerdo con la temperatura de operación a la que trabajará el aceite. Esto puede hacerse por recomendaciones del fabricante, por cálculos, o usando tablas o diagramas que muestran el cambio de la viscosidad con la temperatura.
2. Decidir qué índice de viscosidad es necesario para cubrir todo el rango de temperatura, desde las bajas, en el arranque, hasta las temperaturas máximas de operación.
3. Determinar la calidad requerida del aceite (base mineral, natural, o sintética).
4. Si la máquina posee diferentes componentes a lubricar, decidir

convenientemente si es posible emplear el mismo aceite para todos ellos.

5. Hay que considerar que existen, principalmente, aceites para motores de combustión interna, transmisiones automotrices, sistemas de frenos y usos industriales.

Operar (almacenar, aplicar)

1. Asegurarse del adecuado estado de las condiciones del aceite.
2. Efectuar una estricta vigilancia y atención durante el almacenamiento y trasiego con el fin de evitar derramamientos que contaminen el medio ambiente.
3. El almacenamiento debe ser en un local techado y próximo a los sitios de aplicación. No debe estar expuesto al agua o altas temperaturas.
4. Si el almacenamiento es en el exterior, los depósitos deben colocarse horizontalmente (acostados) y no deben apoyarse directamente sobre el suelo (para no absorber humedad por higroscopicidad).
5. Garantizar la limpieza y el orden del local.
6. Utilizar primeramente los aceites de más antigua procedencia.
7. Deben existir servicios de extinción de incendios, así como prohibir fumar en el local de almacenamiento. Los aceites detergentes no deben mezclarse con los normales o los de primera.
8. Aplicar los aceites directamente desde sus envases de origen a los puntos precisos. Evitar los trasvases.
9. No mezclar aceites de diferentes marcas, viscosidades o servicios.

Mantener (garantizar vida útil del aceite y de los equipos)

1. Utilizar el lubricante adecuado.
2. Establecer una frecuencia de cambio y/o relubricación.
3. Aplicar la cantidad necesaria.
4. Seguir normas de manipulación y almacenamiento de lubricantes.
5. Usar el método apropiado de lubricación.
6. Estudiar las posibilidades de sustituir y mejorar los sistemas de engrase elementales.

7. En lo posible utilizar sistemas S. L. C.

Tabla 46. Campo de aplicación de los Métodos de lubricación a pérdida total

	Criticidad del equipo	Costo del equipo donde se utiliza	Nº de puntos a lubricar	Accesibilidad en el equipo	Velocidad de operación m/min	Operación del equipo, al momento de aplicar	Costo de implementación	Casos típicos de aplicación	Ventajas	Desventajas
Manual con brocha	Baja	Muy bajo	Pocos	Alta	Muy baja $V << 915$	Con equipo deseado, preferib.	Muy bajo	T x Cadena	Sencller y economía	Sistemas abiertos, fácilmente contaminables
Manual con accitera	Baja	Muy bajo	Pocos	Alta	Muy baja $V << 915$	Con equipo deseado, preferib.	Muy bajo	Bisagras, mecanismos simples	Sencller y economía	Sistemas abiertos, fácilmente contaminables, el aceite se escurre
Manual con engrasadora	Baja	Bajo - medio	Pocos	Alta	Muy baja $V < 915$	Con equipo deseado, preferib.	Bajo	Máquinas simples, chumaceras de ventiladores, centrifugos, etc.	Sencller y economía	La presión de inyección es baja por lo que puede quedar incompleta la lubricación
Engrasadora neumática	Medio - alta	Medio - alto	Uno o múltiples	Medio - Alta	$V < 915$	Con equipo deseado, preferib.	Medio	Cambioses y automóviles, plantas	Sencller y Efectividad	Requiere una instalación de Aire comprimido
Por goteo (semi-automático), con o sin vacío	Medio - alta	Medio - Alto	Usuario (por vaso) o unos pocos puntos	Medio - Alta	Muy baja $V << 915$	Con equipo en operación	Medio	Grandes chumaceras o cojinetes	Simplicidad	Requiere supervisión relativamente permanente. Riesgo de daño por descaído
Baño de niebla	Medio - alta	Alto	Múltiples	Baja. Como es automático no es necesario acceder de manera frecuente a los puntos	$V > 2125$	Con equipo en operación	Alto	Petroquímica. Bombas, reductores, bombas de vacío	Efectividad. Confiabilidad	Elevado costo instalación. Personal especializado para montaje y Mto. Es contaminante
Centralizada por aceite o grasa	Medio - alta	Alto	Múltiples	Baja. Como es automático no es necesario acceder de manera frecuente a los puntos	Desde bajas hasta $V < 2125$	Con equipo en operación	Alto	Maquinaria CNC	Efectividad. Confiabilidad	Elevado costo instalación. Personal especializado para montaje y Mto.

10.5. Preguntas de consulta, análisis, ejercicios

10.5.1. Para un Rodamiento 6216. C3 describir tipo de rodamiento, forma de los elementos rodantes, dirección de la carga que soportan, diámetro exterior, diámetro exterior, ancho o altura, peso aproximado, velocidad angular límite (para lubricación con grasa y con aceite), holgura radial (valor), cargas límite tanto estáticas como dinámicas.

Determinar las dimensiones de eje y agujero (tolerancias de montaje) sabiendo que la carga será giratoria en el anillo interior, carga normal.

Determinar la cantidad de grasa con la cual se debe relubricar. Por último, precisar con una engrasadora en particular ¿cuántos pistolazos de grasa requiere el rodamiento que sea apto para lubricar con grasa?

10. 5.1. Para un rodamiento 6220. C3. Describir tipo de rodamiento, forma de los elementos rodantes, dirección de la carga que soportan, diámetro exterior, diámetro exterior, ancho o altura, peso aproximado, velocidad angular límite (para lubricación con grasa y con aceite), holgura radial (valor), cargas estáticas y dinámicas límites.

Determinar las dimensiones de eje y agujero (tolerancias de montaje) sabiendo que la carga será giratoria en el anillo interior, carga normal.

Determinar la cantidad de grasa con la cual se debe relubricar. Por último, precisar con una engrasadora en particular, ¿cuántos pistolazos de grasa requiere el rodamiento que sea apto para lubricar con grasa?

10.5.2. Consulte y describa gráficamente cómo se lubrica una turbina a vapor, con una potencia del orden de 200HP ¿Qué lubricantes se aplican? ¿Qué métodos de lubricación se aplican?

10.5.3. Consulte y describa la operación de una plegadora hidráulica. Aplique el procedimiento descrito en el numeral 5.2. ¿Qué lubricantes se aplican allí? ¿Qué métodos de lubricación se aplican?

10.6. Un estudio de caso. prueba de análisis termográfico a torno TOSSN 40, n° 3 de la Universidad Tecnológica de Pereira

A continuación, se describe el procedimiento seguido para solucionar un problema de calentamiento excesivo del sistema de lubricación del Torno TOS SN 40, n° 3. Para solucionar el problema se aplicó la técnica de mantenimiento predictivo

llamada Análisis Termográfico, para finalmente y con base a algunos razonamientos llegar a la conclusión que el problema había sido originado por un mal cambio de especificación de lubricante.

Antecedentes.

Durante el período vacacional el personal del taller le realizó Mantenimiento al Torno 3 (cambio de rodamientos, retenedores, o 'ring, etc.); le aplicaron aceite ISO 68 al sistema de lubricación, se puso a prueba el equipo (en vacío y a 1000 RPM), observándose a simple vista y tacto temperaturas muy elevadas, en especial en la parte trasera del husillo y en la bomba de lubricación.

Se lanzaron varias conjeturas acerca de la causa probable de dicho recalentamiento (problemas de ajuste de los rodamientos, daño de la bomba de lubricación, problemas del embrague, viscosidad del aceite, etc.).

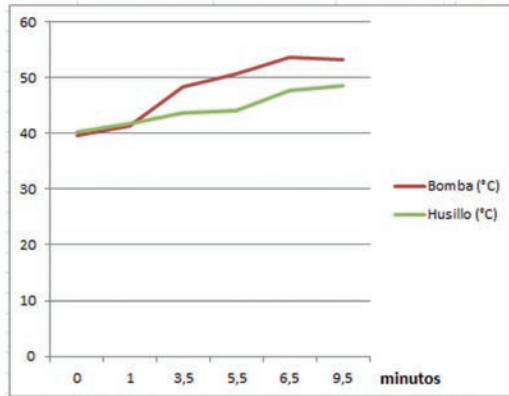
Se hizo una primera sesión de mediciones de temperatura, en la tarde del día 15 de julio. El torno había operado en vacío un rato, antes de efectuar la medición. La medición entregó temperaturas del orden de 59°C (aceite ISO 68) en los puntos críticos mencionados. Esta temperatura se alcanzó en cuestión de unos pocos minutos. Una pesquisa inicial reportó que hubo un cambio de aceite, dado que antes del mantenimiento el aceite usado era un ISO 37 y se le cambió por un ISO 68 (¡casi el doble de viscosidad!).

Mediciones y observaciones posteriores.

Se realizaron otras dos sesiones de mediciones de temperatura

Para el segundo grupo de mediciones se trabajó con el mismo aceite ISO 68, pero se decidió dejar que el torno llegara a una temperatura lo más cercana posible a la ambiental, para lo cual se esperó hasta finalizar la tarde del mismo 15 de julio obteniéndose los valores y curvas mostradas en la Figura 169. De esta Figura se resalta que en tan solo **9,5 minutos** los dos componentes de interés alcanzaron una temperatura del orden de **53,5°C**. Se observó además en la mirilla del aceite que éste se encontraba con **espuma** (inclusiones de aire) y el ruido del torno no era el normal de operación.

Figura 168. Curva variación de temperatura con aceite ISO 68
Tomado de [3]



Tiempo (minutos)	Bomba (°C)	Husillo (°C)
0	39,7	40,3
1	41,4	41,8
3,5	48,3	43,7
5,5	50,7	44,2
6,5	53,6	47,7
9,5	53,2	48,5
9,5	13,5	8,2
°C / min	1,4	0,9

Ante estos resultados, se decidió descartar problemas con la viscosidad del aceite y para el tercer grupo de mediciones se drenó el aceite ISO 68 y se cambió por aceite ISO 37; la prueba se realizó el día 16 en la tarde, con la máquina inicialmente a temperatura ambiente, y sin haber operado previamente. Los valores y curvas obtenidas se muestran en la Figura 170.

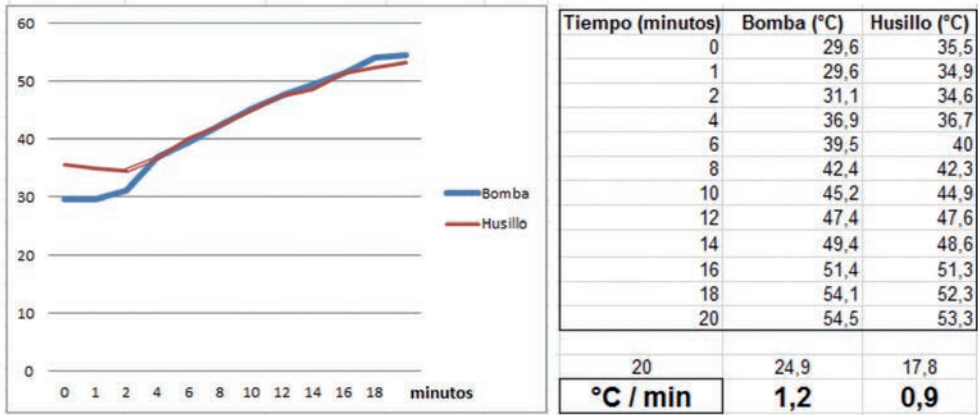
De la Figura 170 se resaltan varias cosas:

- A pesar de que las temperaturas finales son similares a las de la prueba con ISO 68, el período de tiempo en el cual se alcanzó es mucho más prolongado que en el caso del aceite ISO 68 (20 min frente a los 9,5 con ISO 68).
- En la mirilla del aceite no se observó espuma (inclusiones de aire) y el ruido del torno en operación cambió al timbre normal.
- Las temperaturas de ambos componentes son muy homogéneas, caso contrario al del ensayo 2 en donde se aprecia una diferencia del orden de 4,7°C entre

husillo y bomba; esto se explica en función de que al ser el aceite ISO 68 más viscoso que el ISO 37, la bomba trabaja más forzadamente y envía menos caudal de aceite hacia la zona del husillo en estudio (por ello las inclusiones de aire). En este caso al no haber inclusiones de aire el flujo de aceite es muy constante, lo cual redundará en temperaturas muy homogéneas.

Figura 169. Curva variación de temperatura con aceite ISO 37

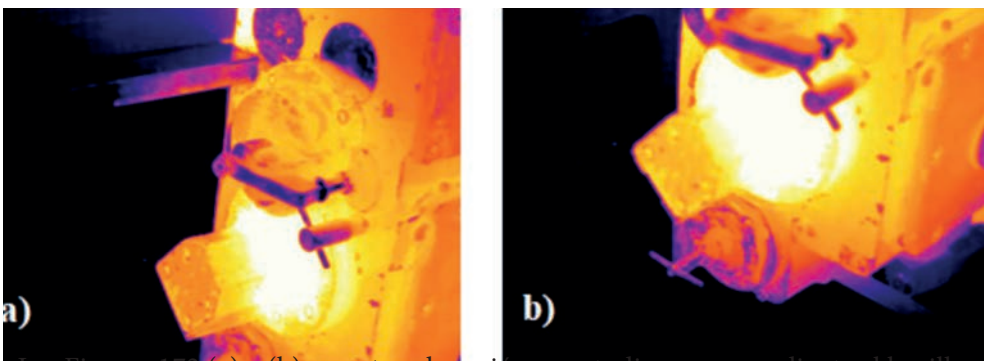
Tomado de [3]



Las Figuras 171 (a) y (b) muestran las imágenes termográficas de la región en estudio correspondiente a la bomba, operando con aceite ISO 68 y con aceite ISO 37 respectivamente. Se puede apreciar que a pesar de que puntos más calientes presentan temperaturas similares, hay más regiones frías con aceite ISO 37 que en el otro caso.

Figura 170. Termografías de la bomba con aceite ISO 68 e ISO 37

Tomado de [3]



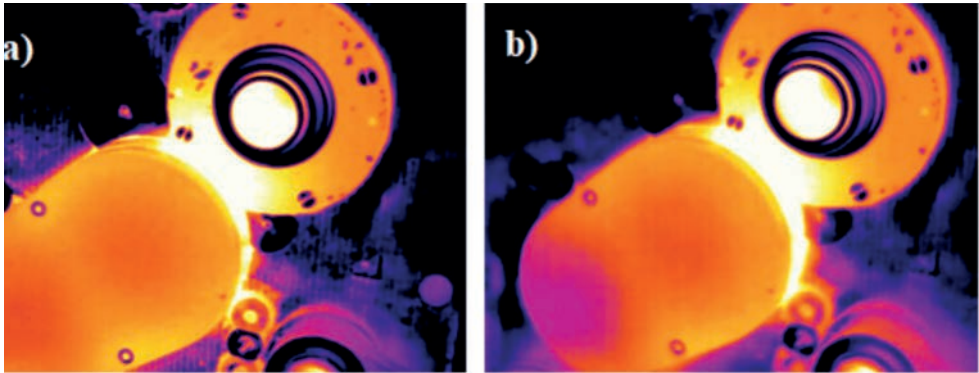
Las Figuras 172 (a) y (b) muestran la región en estudio correspondiente al husillo,

Tabla 47. Campo de aplicación de los Métodos de lubricación circulatorios.

	Criticidad del equipo	Costo del equipo donde se utiliza	Nº de puntos a lubricar	Accesibilidad en el equipo	Velocidad de operación m/min	Operación del equipo, al momento de aplicar	Costo de implementación	Casos típicos de aplicación	Ventajas	Desventajas
Por baño o gravedad	Baja - media	medio - alto	Mono sistema	Alta	Muy baja $V < 915$	Con equipo en operación	Medio	Mazas bagaceras	Relativa simplicidad y bajo costo	Fácil de contaminarse
Por salpique sin distribuidor	Baja - media	Todos	Mono sistema	Baja. Como es automático no es necesario acceder de manera frecuente a los puntos	En general para $V < 915$. Si: $V < 780$ solamente se introduce el engrase conductor Si: $780 < V < 915$ se introducen conductor y conductor y conductor	Con equipo en operación	Bajo - medio	Reductores de velocidad, chumaceras	Relativa simplicidad y bajo costo	Limitantes de velocidad periférica
Por salpique con distribuidor (anillo, cadena, etc.)	Baja - media	Todos	Mono sistema	Baja. Como es automático no es necesario acceder de manera frecuente a los puntos	$915 < V < 1525$	Con equipo en operación	Bajo - medio	Reductores de velocidad, chumaceras	Relativa simplicidad y bajo costo	Limitantes de velocidad periférica
Por circulación a presión (combinados)	Alta	Todos	Mono sistema	Baja. Como es automático no es necesario acceder de manera frecuente a los puntos	< 2125	Con equipo en operación	Medio - alto	Motores combustión interna, compresores	Muy Confiables	Costo de implementación. Requiere instrumentación para vigilancia

operando con aceite ISO 68 y con aceite ISO 37 respectivamente. Se puede apreciar en el caso del ISO 68 (48,5°C), que a pesar de que la temperatura es inferior al caso de ISO 37 (53°C), la vecindad completa del husillo está más caliente que en el caso de ISO 37, donde se aprecian gradaciones rápidas de la temperatura, a pesar de haber trabajado por un período de tiempo más prolongado.

Figura 171. Termografías de la bomba con aceite ISO 68 e ISO 37
Tomado de [3]



Lo sucedido refuerza con un contra-ejemplo por qué no se debe violar la recomendación dada en 10.4.4, de no cambiar indiscriminadamente de una especificación de aceite a otro, sobre todo cuando la diferencia de viscosidades es tan amplia (de 37cSt a 68 cSt).

CAPÍTULO ONCE

Selección de un modelo o política de Mantenimiento

A lo largo de los once capítulos anteriores se ha dado una mirada al amplio mundo del Mantenimiento, y se quiere en este capítulo hacer énfasis en algunos aspectos puntuales que ayudarán a reafirmar muy importantes conceptos generales y a adquirir una visión de conjunto sobre el grueso de los temas tratados.

Para el propósito mencionado se ha traído de nuevo a colación la Figura 18 (numeral 1.6), que muestra: la evolución histórica del Mantenimiento a lo largo de cuatro generaciones bien definidas, las características principales de cada generación y los Sistemas de Mantenimiento (tratados a lo largo del libro) presentes en cada generación histórica.

A continuación, se presenta una situación, que le puede ocurrir a un novel profesional (y que siendo estudiante universitario debe avizorarla): “Ingeniero o Tecnólogo *K...* Usted debe hacer parte del equipo de montaje de *X planta nueva*, y posteriormente deberá hacerse cargo del Mantenimiento de esta.

Ante esta situación con seguridad surgirán las siguientes dos preguntas (al margen de otras más particulares):

- A.** ¿Qué sistema o combinación de sistemas de Mantenimiento de los que conozco (al menos en el papel) debo emplear?
- B.** ¿Cuándo debo definir el Plan de Mantenimiento e iniciar la aplicación de las primeras tareas?

La respuesta a la *Pregunta B* es muy rápida y simple. El momento para definir el Plan de Mantenimiento e iniciar su aplicación, *es antes de que la planta comience a operar*.

¿Por qué? Por múltiples razones:

- La mala selección de un proceso/máquina/equipo y/o un mal montaje son un problema que será un recuerdo para la empresa contratista de montajes, pero será una realidad muy traumática para quien quede a cargo de Mantenimiento, porque afectará negativamente, y de manera permanente y sistemática el desempeño de la planta. En la mayoría de los montajes quedan errores y pendientes que usualmente deben ser subsanados por el personal de la planta, y quien vaya a aquedar a cargo de Mantenimiento debe conocerlos de antemano.
- Una vez que se marche la empresa de montajes, el personal de Planta

queda a cargo de hacerla funcionar, muchas veces en simultánea con el entrenamiento de los operadores y los mantenedores. Es una etapa de aprendizaje y estrés para todo el personal, donde regularmente el proceso productivo sufre muchas alteraciones mientras como se dice en la jerga popular “se asienta”. La prioridad para las directivas en esta etapa inicial es que la planta funcione y produzca, ante todo en el contexto tan competitivo en que se vive actualmente.

- Como se pudo apreciar a lo largo de la obra, y en particular con la dinámica de *Planear, Programar, Ejecutar, Medir y Comparar* (Figura 2, Capítulo 1), acarrea labores dispendiosas, y tratar de hacerlas de manera precipitada en medio del *día a día* del arranque, no es muy exitoso, en particular porque los recursos para el Mantenimiento (herramientas, filtros, lubricantes, repuestos genéricos, repuestos específicos importantes, etc.) debieron haberse adquirido con antelación, ajustándose a los procesos y tiempos reales de compra en una empresa (que pueden ser de varios días en los mejores casos).
- Muchas empresas nuevas no tienen en cuenta las situaciones anteriores, y usualmente sucede que al iniciar operaciones la planta, ya han acumulado *Backlog* ejecutable y no ejecutable (ver numeral 15.1), infringiéndole desgastes innecesarios a máquinas/equipos nuevos o en buen estado y en el peor de los casos, ocurriendo fallas funcionales. En la realidad se presentan muchos casos de empresas que inician operaciones y la labor principal se vuelve como se dice en el argot del mantenimiento “apagar incendios”, mientras que las labores proactivas, preventivas y predictivas pasan a un segundo o tercer plano.

Ahora, la respuesta a la **Pregunta A** no es tan rápida y simple como la respuesta a la **Pregunta B**. Una primera tentación sería responder con base a la Figura 18 (numeral 1.6), en la que se recuerda que cada sistema de Mantenimiento posee unas efectividades asociadas, siendo la mayor la ofrecida por el Mantenimiento Basado en el Riesgo RBM; bordeando el 90%, y la menor, la ofrecida por el Mantenimiento básico, rondando el 46%.

Si el novel profesional se guía por las efectividades, elegiría TPM, RCM o RBM, pero en esta elección tan fácil y tan “soñada” subyacen varias preguntas:

- ¿Está la empresa interesada y comprometida con sistemas de Mantenimiento en los cuales debe participar toda la organización?
- ¿Están el personal y la organización capacitados y maduros para implementar

TPM, RCM y RBM?

- ¿Por el tipo de proceso/máquinas/equipos que posee la empresa será necesario implementar RBM por ejemplo?

Si no fue esta la situación que se presentó y se decidió aplicar Mantenimiento predictivo, igualmente surgen muchas preguntas, y se le propone al lector que anticipe algunas de ellas.

Con estas pocas líneas, lo que se está planteando es que la elección en la **Pregunta B** puede ser muy compleja y la probabilidad de desacierto muy alta, razón por la cual se presenta una guía o metodología propuesta por *Duffua* [99], para definir la *rigurosidad y profundidad* de las tareas de mantenimiento. A esta metodología se le han hecho algunos aportes propios en lo concerniente con tener en cuenta el *Riesgo* (Capítulo 7). Se trata de una metodología elaborada, y muy efectiva basada en 4 pasos:

- Definir la criticidad de la máquina/equipo en el proceso productivo.
- Estudiar el Riesgo que encarna la operación de la máquina/equipo en estudio.
- Definir el *modelo de Mantenimiento* a aplicar.
- Validar condiciones adicionales.

Es necesario aclarar que el término *Modelo de Mantenimiento* no debe entenderse como los *Sistemas de Mantenimiento* (Capítulo 1). El Modelo de mantenimiento está asociado, como se dijo líneas arriba con la rigurosidad y profundidad, y podría entenderse más como política de Mantenimiento. *Duffua* reconoce 5 *modelos de mantenimiento*, los cuales se describirán brevemente a continuación:

- **Modelo correctivo.** Aplicable a máquinas/equipos de muy bajo nivel de criticidad (prescindibles), cuyas averías no implican problemas económicos o técnicos, por lo tanto, no es rentable dedicar recursos a su mantenimiento. Los equipos que queden cobijados por este modelo pueden sufrir fallas funcionales y no interferirán con la producción. Incluye tareas de inspección, lubricación y reparación si ocurre la avería.
- **Modelo condicional.** Aplicable a máquinas/equipos de poco uso o equipos importantes en el proceso productivo, pero que su probabilidad de falla es muy baja. Incluye las tareas Inspección, lubricación y reparación, pero adicionalmente se le programan una serie de pruebas y ensayos al equipo que determinarán que se considere o no la ejecución de un Correctivo programado.
- **Modelo sistemático.** Aplicable a máquinas/equipos de disponibilidad media y

de baja importancia en el proceso productivo, por lo tanto, si se averían pueden causar algunos trastornos. Este modelo se basa en definir unas tareas que se ejecutarán a una frecuencia fija (así la máquina/equipo esté en buen estado) y se complementa con las tareas propias del modelo condicional. Es importante aclarar que un equipo puede requerir aplicar modelo condicional a algunos de sus subsistemas, mientras que en otros requerir algunos de los otros modelos relacionados.

- **Modelo de alta disponibilidad.** Aplicable a máquinas/equipos cuya disponibilidad debe estar por encima del 90%, o dicho en otros términos la criticidad del equipo en el proceso productivo es muy grande. Regularmente se aplica en equipos para los cuales se programa una parada anual o puesta a cero u *overhaul*, y durante el año se realizan inspecciones, lubricaciones, ajustes y reparaciones provisionales que no impliquen parada del equipo. Una diferencia importante con los modelos anteriores es que aplica técnicas predictivas para determinar con suficiente antelación fallas potenciales, y en caso tal realizar reparaciones provisionales (sin detener el equipo), programar repuestos y recursos y si es del caso adelantar la parada general. Durante la parada general opuesta a cero se realizan modificaciones, cambios de partes en mal estado o susceptibles de fallar (los cuales deben tener vida útil del orden de dos años), se deben corregir las reparaciones provisionales efectuadas previamente, ajustar, calibrar, probar y poner a punto la máquina/equipo, de forma tal que se garantice el trabajo por el siguiente período anual.

Una vez que se defina el *Modelo de mantenimiento*, se debe hacer una validación de otras dos situaciones: la normatividad legal sobre la operación de las máquinas/equipos, y el carácter de subcontratado o propio, respecto del personal que atenderá el mantenimiento de la planta.

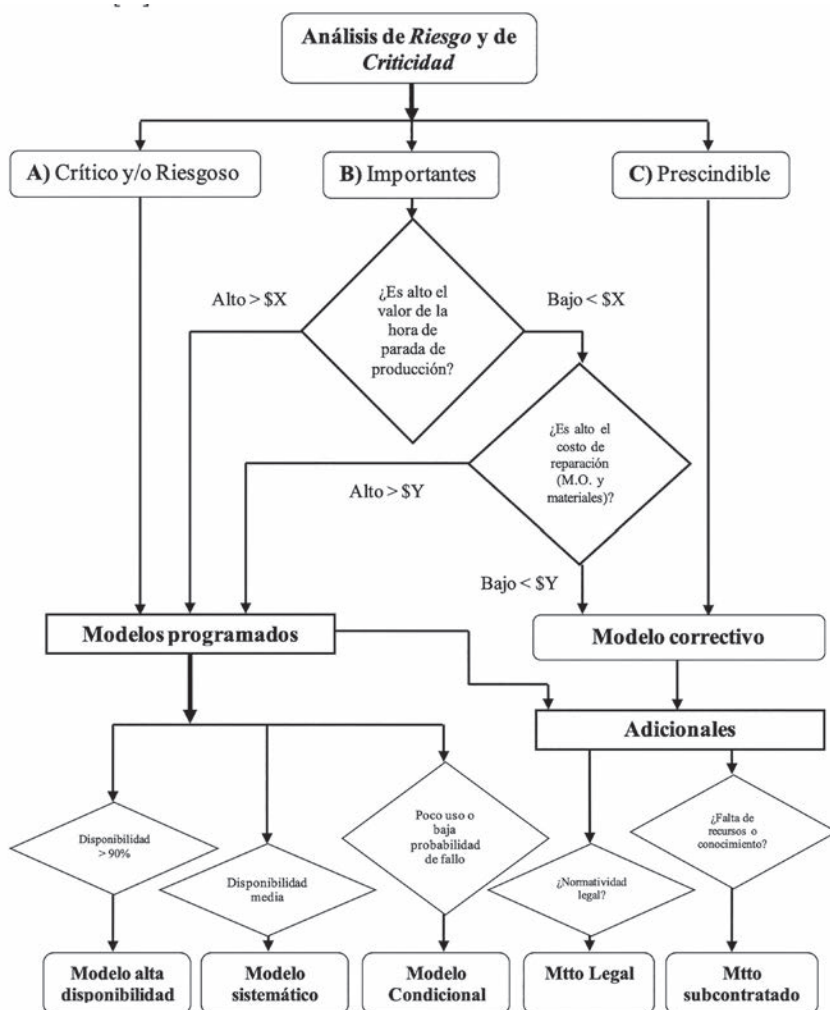
En la parte *legal*, es necesario verificar si a algunos de los equipos de la planta se les debe efectuar algún tipo de pruebas o revisiones *legales* prescritas por entidades gubernamentales bajo leyes específicas. Ejemplo, Instalaciones contraincendios, instalaciones de alta y media tensión, equipos y aparatos a presión, algunos sistemas de elevación de cargas o de personas, medición en fuentes contaminantes, revisión técnico-mecánica de vehículos, etc.

Por último, en cuanto al tipo de vinculación con la empresa, es importante precisar de manera anticipada si las tareas a programar podrán ser efectuadas por personal propio o si es necesario acudir a personal especializado externo a la empresa (*outsourcing*); esta decisión se toma con base a dos criterios, la falta de conocimientos del personal propio y en la ausencia de equipos o maquinaria especializada para las

labores. El diagrama de flujo de la Figura 173 presenta el procedimiento gráfico para realizar la elección del *modelo de mantenimiento*.

En la Figura 173, las cantidades \$X y \$Y, deben ser definidas por cada empresa en particular, a no ser que exista información gremial de referencia.

Figura 172. Elección de un Modelo de Mantenimiento
Tomado de [99]



En la Tabla 48 se presenta un paralelo de las características de cada modelo de mantenimiento y algunos ejemplos de aplicación.

		Tareas generales a realizar						Ejemplos de aplicación
Modelo de Mantenimiento	Criticidad del equipo a aplicar	Inspección visual	Lubricación básica	Reparación de averías	Mantenimiento en caso de ser indicado por las pruebas ó ensayos	Tareas sistemáticas	Parada general programada ó puesta a cero	
Correctivo	Muy baja. Prescindible	X	X	X				Luminarias
Condicional	Importantes, pero de baja probabilidad de falla. De baja utilización	X	X	X	X			Planta eléctrica de respaldo
Sistemático	Baja importancia pero de mediana disponibilidad	X	X	X	X	X		Tren de aterrizaje y motor de un avión
Alta disponibilidad	Alta criticidad, Alta disponib., Alto Riesgo	X	X	X	X	X	X	Turbinas para generación energía eléctrica Hornos de grandes industrias Depósitos reactores o tanque reactores

De manera complementaria, y para crear conexión entre los *sistemas de*

Mantenimiento y los *Modelos de Mantenimiento*, se ha elaborado la tabla 49, en la que se muestra una guía general de los sistemas de mantenimiento empleados en cada modelo de mantenimiento.

Tabla 49. Modelos de Mantenimiento y sistemas de mantenimiento.

Tabla 49. Modelos de Mantenimiento y sistemas de mantenimiento.

Modelo de Mantenimiento	Sistemas de Mantenimiento
Correctivo	Mantenimiento autónomo Correctivo programado
Condicional	Mantenimiento autónomo Correctivo programado Mantenimiento Programado <i>básico</i> Mantenimiento Preventivo <i>básico</i> Aportes básicos de Predictivo
Sistemático	Mantenimiento autónomo Correctivo programado Mantenimiento Programado Mantenimiento Preventivo Mantenimiento Predictivo
Alta disponibilidad	Correctivo programado Mantenimiento programado Mantenimiento Preventivo Mantenimiento Predictivo Mantenimiento Productivo Total Mantenimiento centrado en la Confiabilidad Mantenimiento basado en el Riesgo

CAPÍTULO DOCE

Mantenimiento analítico (*indicadores e índices*)

12.1. Introducción

En el Capítulo 1 se acotó que el *Mantenimiento Analítico* en sí mismo no es un sistema de mantenimiento, sino que se trata de una serie de metodologías transversales a los otros sistemas de mantenimiento, para apoyar el análisis y toma de decisiones durante la gestión y administración del mantenimiento.

El Mantenimiento Analítico se basa preferentemente en el uso de estadísticas para conformar indicadores de mantenimiento e índices de falla y de gestión para:

- Determinar la causa raíz de un problema
- Conformar un panorama de la gestión del Mantenimiento
- Facilitar la toma de decisiones

El presente capítulo tratará sobre los indicadores de mantenimiento y los índices de falla, su importancia, elaboración y aplicación básica.

12.2. Índices de gestión de mantenimiento

Muchas veces no se tiene la percepción de que nuestras vidas son reguladas (y en algunos casos regidas) por indicadores, pero cuando se piensa con calma el asunto se llega a la conclusión que así ocurre (al menos en muchos ámbitos); como ejemplos claros de lo anterior se tiene: el precio del barril de petróleo, la tasa representativa del mercado (en dólares y en euros), el valor de la onza de oro, etc.

Citas de algunos científicos y pensadores expresan la importancia de las mediciones y por supuesto de los indicadores:

“Cuando puedas medir lo que estás diciendo y expresarlo en números, sabrás algo acerca de eso; pero cuando no puedes medirlo, cuando no puedes expresarlo en números, tus conocimientos serán escasos y no satisfactorios”

Lord Kelvin

“No se puede controlar lo que no se puede medir”

Tom De Marco

“No se puede predecir lo que no se puede medir”

Norman Fenton

Los Índices o Indicadores son relaciones cuantitativas o cualitativas que se establecen entre variables, para evaluar sus proporciones o comportamientos. Los índices de mantenimiento son elementos informativos que permiten tomar decisiones de manera objetiva.

Los índices de Mantenimiento deben cumplir ciertas características:

Validez: Deben recopilar información relativa a un proceso productivo.

Confiabilidad: La información presentada por ellos debe ser veraz y creíble.

Especificidad: Deben establecerse con base en los objetivos del mantenimiento, por ello deben configurarse de forma tal que permitan evaluar los objetivos del mantenimiento.

Sensibilidad : Deben diseñarse de forma tal que muestren de manera inmediata los cambios que hay en el desempeño del elemento a evaluar (áreas, máquinas, equipos, componentes, etc.).

Accesibilidad: Un buen indicador es aquel en el cual la información necesaria para construirlo es de fácil consecución y procesamiento.

Unívocos: Un indicador correctamente formulado no debe prestarse para interpretaciones distintas al momento de su evaluación.

Los índices pueden ser **cuantitativos** o **cualitativos**, pero la idea es al máximo, hacer uso de los cuantitativos, puesto que se reduce el componente subjetivo de la evaluación. Por ejemplo, si se quisiera evaluar la limpieza de un equipo (tarea básica en Mantenimiento) de manera cualitativa, se podría cualificar como **Mala**, **Regular**, **Buena** y **Excelente**, pero previamente tendría que definirse qué estado se corresponde con cada una de las cualificaciones, para evitar que lo que para un observador sea **Excelente** o **Bueno**, para otro sea **Regular** o **Malo**.

Tipos de indicadores en Mantenimiento.

Se encuentran en tres grupos genéricos de índices: de Eficacia del Mantenimiento, de Administración del Mantenimiento y de Costos de Mantenimiento

12.2.1. Indicadores de Eficacia del Mantenimiento

Son aquellos destinados a mostrarle, principalmente, al Gerente/Jefe de Mantenimiento cómo anda su gestión, desde el punto de vista de efectividad en la ejecución (tabla 50), es decir, disponibilidad de la planta, número de varadas, tiempo perdido por varadas, etc. De este grupo los indicadores más ampliamente utilizados

son *Disponibilidad*, *Confiabilidad* y *Mantenibilidad*, los cuales se describirán a continuación.

Disponibilidad (fórmula 27): capacidad de una máquina/equipo de llevar a cabo con éxito la función requerida, durante un tiempo determinado, en unas condiciones específicas. Se determina en función del Tiempo Programado para Producción **TPP** y del Tiempo de Paradas No Programadas **TPNP**.

$$D = 100 \times \frac{TPP - TPNP}{TPP} \quad (27)$$

Donde

- D es el porcentaje de disponibilidad;
 TPP es el tiempo planeado para la producción;
 $TPNP$ es el tiempo de paradas no programadas.

Confiabilidad (fórmula 28): Probabilidad de que un equipo no falle durante su operación. Se evalúa por intermedio del Tiempo Promedio Entre Fallas (TPEF).

$$TPEF = \frac{T_{op}}{N_{arr}} \quad (28)$$

Donde

- $TPEF$ es la confiabilidad o tiempo promedio entre fallas;
 T_{op} es el tiempo real de operación de la planta;
 N_{arr} es el número de arranques de planta.

Mantenibilidad (Fórmula 29): Se conocen dos definiciones de diferente profundidad, pero que describen la misma situación. La Mantenibilidad se evalúa con el Tiempo promedio para reparar **TPPR**.

Definición 1. Propiedad de un *Equipo o Sistema* que representa la cantidad de esfuerzo requerida para conservar su funcionamiento normal o para restituirlo una vez se ha presentado un evento de falla. Se dirá que un sistema es *Altamente Mantenible* cuando el esfuerzo asociado a la restitución sea bajo. Sistemas *Poco Mantenibles* o de *Baja Mantenibilidad* requieren de grandes esfuerzos (horas-hombre, supervisión, repuestos, insumos) para sostenerse o restituirse.

Definición 2. Probabilidad de que un equipo pueda ser puesto en condiciones operacionales en un período de tiempo dado, cuando el mantenimiento es ejecutado

de acuerdo con procedimientos preestablecidos.

$$TPPR = \frac{T_{nop}}{N_{arr}} \quad (29)$$

Donde

$TPPR$ es el tiempo promedio para reparar;

T_{nop} es el tiempo que duraron las intervenciones de mantenimiento;

N_{arr} es el número de arranques de planta.

El conjunto de indicadores de Eficacia de Mantenimiento es presentado en la tabla 50, indicando nombre, fórmula para su cálculo y Usuarios a quienes principalmente les interesa su valor.

Se puede apreciar de la tabla 50 que el indicador Eficiencia Global de Equipo EGE se encuentra en negrilla, resaltando su importancia, ya que de manera combinada indica:

- Cuánto tiempo laboró el equipo (indirectamente dice cuánto duraron las varadas)
- A qué velocidad de producción operó mientras estuvo en funcionamiento
- Si mientras operó entregó el producto con la calidad esperada.

Como un criterio generalizado, y de acuerdo a referentes de clase mundial, la Disponibilidad de un equipo debe ser mayor al 90%, la Velocidad de producción del orden del 95%, y el Porcentaje de producto conforme del orden del 99%, con lo cual la EGE de una máquina/equipo debe ser del orden del 85%.

12.2.2. Indicadores de Administración del Mantenimiento

Este grupo de indicadores (tabla 51) se encarga de valorar la forma como se están (*o no se están*) alcanzado los objetivos del Mantenimiento en función de las horas-hombre ejecutadas (o dejadas de ejecutar), es decir, es probable que la planta se haya varado una cantidad de veces pequeña y que la calidad de la producción sea la adecuada, pero vendrían las siguientes preguntas ¿Se están ejecutando adecuadamente las OTs? ¿Cuánto porcentaje de OTnS se están ejecutando? ¿Ha sido necesario llamar de manera recurrente el personal de mantenimiento a trabajar horas extras para poner a punto las máquinas/equipos y evitar una varada al día siguiente? ¿Ha sido necesario subcontratar más de lo previsto? ¿Cuántas OTs se dejaron de hacer? Entre otras.

Tabla 50. Indicadores de Eficacia del Mantenimiento
Tomado de [100]

Eficacia del Mantenimiento	Fórmula	Descripción de variables	Usuario del Índice
% Disponibilidad del Equipo D	$D = 100 \times \frac{TPP - TPNP}{TPP}$	TPP , es el tiempo planeado para la producción; $TPNP$, es el tiempo de paradas no programadas.	M, P, G
% Velocidad de Producción V_p	$V_p = 100 \times \frac{U_{pr}}{U_{pl}}$	U_{pr} , son las unidades producidas; U_{pl} , son las unidades planeadas.	M, P, G
% Producto conforme P_c	$P_c = 100 \times \frac{U_{pr} - U_{nc}}{U_{pr}}$	U_{nc} , son las unidades no conformes	M, P, G
Eficiencia global del equipo EGE	$EGE = D \times V_p \times P_c$		M, P, G
Paros por Hora P_h	$P_h = \frac{P_{pr}}{TPP - TPNP}$	P_{pr} , es el número total de paros de producción.	M, P, G
% Trabajo no programado W_{np}	$W_{np} = 100 \times \frac{T_{np}}{T_{mtto}}$	T_{np} , son las horas de trabajo no programado; T_{mtto} , son las horas totales laboradas en mantenimiento.	M, G.
% Tiempo debido a fallas T_f	$T_f = 100 \times \frac{T_{falla}}{TPNP}$	T_{falla} , es el tiempo perdido debido a fallas	M, P, G
% Horas de reparación H_{rep}	$H_{rep} = \frac{T_{rep}}{T_{mtto}}$	T_{rep} , son las horas de mantenimiento empleadas en reparar averías.	M
(Confiabilidad) $TPEF$	$TPEF = \frac{T_{op}}{N_{arr}}$	T_{op} , es el tiempo real de operación de la planta; N_{arr} , es el número de arranques de planta.	M, G
$TPPR$	$TPPR = \frac{T_{falla}}{N_{arr}}$	N_{arr} , es el número de arranques de planta	M

Convenciones de tablas 50, 51 y 52:

G: Gerencia M: Departamento de Mantenimiento P: Departamento de producción
 TPP: Tiempo planeado de Producción TPNP: Tiempo de paradas no programadas

La experiencia industrial del autor le permite afirmar en lenguaje coloquial que el trabajo que se deja de hacer en Mantenimiento y que obviamente se acumula, se convierte en un enemigo que ataca por la espalda en el momento más inoportuno e inesperado, o dicho en términos más técnicos, se pueden aplazar tareas de Mantenimiento, pero hasta cierto punto, porque los equipos se resienten y luego

surgen las indeseables fallas funcionales (varadas).

Otro punto a tener en cuenta, que es costumbre malsana en ciertas organizaciones (en muchas ocasiones auspiciada por directores comerciales) es el de posponer tareas de mantenimiento de un mes a otro (o de un período contable a otro), con el fin de bajar costos de mantenimiento y mostrar unos “buenos” indicadores de costos; esta práctica no es recomendable por dos razones, la primera, al posponer la tarea de mantenimiento se le están infringiendo a la máquina/equipo ligeros deterioros y desgastes que paulatinamente minarán los ajustes y tolerancias de fábrica, y la segunda, llegará el momento en que ocurrirá la falla funcional y lo que se “ahorró” en períodos anteriores será necesario gastarlo con creces en períodos posteriores ...

La tabla 51 presenta el conjunto de los indicadores de administración del Mantenimiento.

12.2.3. Indicadores de Costos del Mantenimiento

Este grupo de indicadores (tabla 52) son muy importantes para la Gerencia de Planta porque cuantifican cuánto se está gastando en Mantenimiento y de qué manera (Correctivo, Preventivo, mano de obra, materiales, etc.).

Cabe recordar que según la Figura 2, y las tablas 2 y 3 del *Capítulo 1*, antes del inicio de cada período (anual y mensual) es necesario elaborar presupuestos de ventas, de costos y de gastos, entre ellos obviamente el de Mantenimiento. La práctica normal (graficada en la Figura 8 del *numeral 1.3.3*) propende a que los costos de mantenimiento en lo posible sean variables, por lo tanto de este grupo de indicadores es sumamente importante el indicador llamado *Costo de mantenimiento por unidad producida* [\$/un]; los [\$/un] permiten hacer comparaciones con períodos contables pasados, con otras sucursales o unidades de negocio o con otras empresas (si se comparte información gremial), y en caso de anomalías entrar a determinar las causas raíz del problema. La tabla 52 presenta el conjunto de los indicadores de Costos de Mantenimiento.

Tabla 51. Indicadores de administración del Mantenimiento. Tomado de [100]

Administración del Mantenimiento	Fórmula	Descripción de variables	Usuario del Índice
% Cobertura Cob	$Cob = 100 \times \frac{OTs - c}{OTs}$	$OTs - c$, son las órdenes de trabajo estándar cerradas. OTs , son las órdenes de trabajo estándar planeadas.	M, G
% Seguimiento al programa, Sp	$Sp = 100 \times \frac{T_s - mtto}{T_{mtto}}$	$T_{s-empto}$, es el tiempo laborado en mantenimiento, según el plan. T_{mtto} , son las horas totales laboradas de mantenimiento	M, G
% Eficacia Mantenimiento, E_{empto}	$Emtto = 100 \times \frac{T_s}{T_{mtto}}$	T_s , es el tiempo estándar programado para mantenimiento.	M, G
% Trabajo pendiente, W_{pend}	$W_{pend} = 100 \times \frac{T_s}{T_s - mtto}$		M, G
% Horas extras por mes, $\%T_{extra}$	$\%T_{extra} = 100 \times \frac{T_{extra}}{T_{mtto}}$	T_{extra} , son las horas extras laboradas en mantenimiento.	M, G
% Horas subcontratadas por mes, $\%T_{ow}$	$\%T_{out} = 100 \times \frac{T_{out}}{T_{mtto}}$	T_{ow} , son las horas de mantenimiento subcontratadas.	M, G
% Productividad laboral, P_{lab}	$P_{lab} = 100 \times \frac{T_s - mtto}{T_{mtto}}$		M, G
% Utilización laboral, U_{lab}	$U_{lab} = 100 \times \frac{T_{prod}}{T_s}$	T_{prod} , son las horas de trabajo productivo	M, G
Índice de productividad compuesta IPC	$IPC = \frac{1}{100} \times P_{lab} \times U_{lab}$	P_{lab} , es el % de productividad laboral.	M, G

Tabla 52. Indicadores de Costos de Mantenimiento. Tomado de [100]

Costos del Mantenimiento	Fórmula	Descripción de variables	Usuario del Índice
Valor agregado a la producción VAP	$VAP = CP - Cm$	CP , es el costo total de producción; C_m , es el costo de materiales.	M, P, G
% Costo de Mtto, % CM	$\%CM = 100 \times \frac{CM}{VAP}$	CM , es el costo total de mantenimiento.	M, P, G
Costo de Mtto por unidad de Producción C_{m-u}	$C_{m-u} = \frac{CM}{U_{pr}}$		M, P, G
% Mano Obra Mtto, % C_{mo}	$\%C_{mo} = \frac{C_{mo}}{CM}$	C_{mo} , el costo de la mano de obra de mantenimiento.	M
Relación costo materiales y costo mano de obra C_{mat-mo}	$C_{mat-mo} = \frac{C_{mat}}{C_{mo}}$	C_{mat} , es el costo de materiales de Mantenimiento.	M
Relación costo materiales y costo total de Mtto C_{mat-CM}	$C_{mat-CM} = \frac{C_{mat}}{CM}$		M
Costo hora Mtto C_{HM}	$CHM = \frac{CM - C_{mat}}{T_{mtto}}$		M, P, G.
Relación costo de supervisión C_s	$C_s = 100 \times \frac{C_{sup}}{CM}$	C_{sup} , es el costo de supervisión de los trabajos.	M
Costo Mtto Prev versus Correctivo C_{c-p}	$C_{c-p} = 100 \times \frac{C_{prev}}{C_{ce}}$	C_{prev} , es el costo del mantenimiento preventivo; C_{ce} , es el costo del correctivo de emergencia efectuado.	M, P, G.
Tasa rotación Inventario T_{ri}	$T_{ri} = \frac{C_{mat}}{I_{pi}}$	I_{pi} es el costo promedio invertido en inventario.	M, G.

12.2.4. Ejemplo de cálculo de indicadores

De un proceso productivo se conoce la siguiente información correspondiente a mes de julio de 2019:

La empresa trabaja dos turnos diarios 16 horas por jornada y la producción planeada para el mes es de 60 000 un. Las unidades reales producidas fueron 54 000, de las cuales 1059 no pasaron los controles de calidad. Para los 25 días hábiles del mes se planearon 25 OT de mantenimiento preventivo, con una intensidad de 2h cada OT (para ejecutar al final de cada jornada).

En el mes hubo 8 varadas, todas imputables a Mantenimiento, las cuales totalizaron 60 horas. Puesto que hubo 8 varadas, se dejaron de hacer 6 órdenes de trabajo preventivas y se generaron 8 órdenes de trabajo emergentes, las cuales se suplieron con personal contratista.

Los gastos totales de Mantenimiento fueron de \$162 000 000 de pesos, el costo de producción promedio por pieza de \$12 000, y el costo promedio de venta de cada unidad producida es \$15 000.

Antes de iniciar el desarrollo, se convertirá la información suministrada a términos de las tablas 50, 51 y 52.

$$TPP = 25 \text{ días} \times \frac{16 \text{ horas}}{1 \text{ día}} = 400 \text{ horas}$$

$$TPNP = 60 \text{ horas}$$

Unidades planeadas = 60 0000; *Unidades producidas* = 54 000;

Unidades no conformes = 1 059;

- ¿Cuál fue la disponibilidad de la Planta?

$$\% \text{ Disponibilidad} = 85\%$$

- ¿Cuál fue el % de velocidad de producción?

$$\% \text{ Velocidad de producción} = 90\%$$

- ¿Cuál es el porcentaje de producto no conforme?

$$\% \text{ Producto no conforme} = 98\%$$

- ¿Cuál es la eficiencia global del equipo EGE?

$$EGE = 0,85 \times 0,90 \times 0,98 = 75\%.$$

- ¿Cumple la EGE de la Planta con el valor deseable? Si no cumple ¿Cuál es el indicador que mayor aporte negativo le está haciendo a la EGE?

EGE real = 75% < EGE deseable = 85% **No cumple**

$\% \text{ Disponibilidad}_{\text{real}} = 85\% < \% \text{ Disponibilidad}_{\text{ideal}} = 85\%$ **No cumple**

$\% \text{ Velocidad producción}_{\text{real}} = 90\% < \% \text{ Velocidad producción}_{\text{ideal}} = 95\%$

No cumple

$$\% \text{ Producto no conforme}_{real} = 98\% < \% \text{ Producto no conforme}_{ideal} = 99\%$$

No cumple, pero por muy poco

Por lo tanto, los indicadores que están haciendo el mayor aporte negativo al no cumplimiento de la EGE son % Disponibilidad y % Velocidad de producción, en el mismo monto.

$$\begin{aligned} \text{Rata esperada de producción} &= 60\,000 \frac{\text{unidades}}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{25 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{16 \text{ horas}} \\ &= 150 \frac{\text{ud}}{\text{horas}} \\ \text{Rata real de producción} &= 54\,000 \frac{\text{unidades}}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{25 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{13,6 \text{ horas}} \\ &= 158,8 \frac{\text{unidades}}{\text{horas}} \end{aligned}$$

Como puede observarse, la planta debió haber operado 400 horas, en la realidad operó 340 horas debido a 60 horas de varadas, pero durante las horas que operó lo hizo a una velocidad superior al *debiera*.

- ¿Cuál es la confiabilidad de la maquinaria?

$$TPEF = \frac{340}{8} = 42,5 \frac{\text{horas}}{\text{puesta en servicio}}$$

- ¿Cuál es la Mantenibilidad de la maquinaria?

$$TPPR = \frac{60}{8} = 7,5 \frac{\text{horas}}{\text{reparación}}$$

La interpretación de los indicadores Confiabilidad y Mantenibilidad es la siguiente:

Cada 42,5 horas de operación de la Planta ocurre una varada, la cual dura en promedio 7,5 horas, antes de poner iniciar nuevamente la producción.

- ¿Cada cuántos días ocurre una varada?

Dado que las varadas ocurren en promedio cada 42,5 horas y las jornadas laborales son de 16 horas, una regla de tres simple, informa que en promedio cada 2,6 días ocurre una varada.

- ¿Cuál es el porcentaje de cobertura, de seguimiento al programa y horas subcontratadas por mes? ¿Qué opina de dichos indicadores?

$$Cob = 100 \times \frac{OTs - c}{OTs} \times 100 = \frac{25 - 6}{25} \times 100 = 76 \%$$

Este indicador hace referencia a las OTs que se ejecutaron, de las inicialmente programadas

$$\% \text{ seguimiento al programa } Sp = 100 \times \frac{T_s - m_{tto}}{T_{m_{tto}}} \times \frac{50 - 12}{50 - 12 + 60} \times 100 = 38,8 \%$$

$$\% \text{ Horas subcontratadas mes } = \% T_{out} = 100 \times \frac{T_{out}}{T_{m_{tto}}}$$

$$\% T_{out} = 100 \times \frac{T_{out}}{T_{m_{tto}}} = \frac{60}{50 - 12 + 60} \times 100 = 61\%$$

- ¿Cuál es el costo de mantenimiento por unidad producida?

$$Cm - u = \frac{CM}{U_{pr}} = \frac{\$162\,000\,000}{54\,000 \text{ unidad}} = \frac{\$3\,000}{ud}$$

- ¿Cuál es el costo de mantenimiento por unidad producida?

$$Cm - u = \frac{CM}{U_{pr}} = \frac{\$162\,000\,000}{54\,000 \text{ unidad}} = \frac{\$3\,000}{ud}$$

- ¿A cuánto porcentaje corresponde dicho costo de mantenimiento respecto del costo de producción? ¿Cuál es el margen de ganancia de la empresa?

El costo de producción por unidad es \$12 000 (enunciado) una regla de tres simple informa el costo de mantenimiento por unidad producida equivalen al 25% el primero.

El Margen de ganancia se puede calcular unitario, total o porcentual.

Margen de ganancia unitario

$$= \text{Costo venta} - \text{Costo producción} = \frac{\$3\,000}{ud}$$

Margen de ganancia total

$$= (\text{Costo venta} - \text{Costo producción})$$

* Ud producidas

$$\text{Margen de ganancia total} = \$ 162\,000\,000$$

Margen de ganancia total

$$= (\text{Costo venta} - \text{Costo producción})$$

* Un producidas

Margen de ganancia porcentual

$$= \frac{\text{Costo venta} - \text{Costo producción}}{\text{Costo producción}} * 100\% = 25\%$$

- Con base a los valores hallados de costo unitario de Mantenimiento y Ganancia unitaria ¿Qué opina del costo de Mantenimiento?

Por cada unidad producida se están gastando \$3 000 en Mantenimiento y se está ganando lo mismo \$3 000 en dicha unidad. Lo anterior lleva a que, como efectivamente ocurrió, se ganaron \$162 000 000, pero se gastaron los mismos \$162 000 000 en Mantenimiento. Debería pensarse en estrategias, bien sea para disminuir costos de producción (incluyendo el de mantenimiento) o de aumentar el costo de venta.

El Gerente de la empresa supone que hay un despilfarro de energía dado que el costo de la factura se ha incrementado de manera sustancial sin que la producción haya subido sensiblemente. El indicador que han manejado es de 0,9 kWh/unidad producida. El 31 de junio de 2019 el contador de energía registró una lectura 151 312 kWh, y el 31 de julio el contador registró una lectura de 232 312 kWh. ¿Considera Ud. que hubo despilfarro? Justifique su respuesta con base en indicadores. En el caso de que considere que hay despilfarro ¿Cuánto costó y por qué pudo haber sucedido? El precio del kWh es de \$400.

$$\begin{aligned} \text{Factor de consumo noviembre} &= \frac{\text{Lectura final} - \text{Lectura inicial}}{\text{unidades producidas}} \\ \text{Factor de consumo noviembre} &= \frac{232\ 312 - 151\ 312}{54\ 000} = 1,5 \frac{\text{kwh}}{\text{unidad}} \end{aligned}$$

Claramente, se aprecia que el factor de consumo subió en un 67%, por lo cual sí hubo despilfarro. Una forma de calcular el sobrecosto es:

$$\begin{aligned} \text{Sobre costo} &= 54\ 000 \text{ unidades} \times (1,5 - 0,9) \frac{\text{kwh}}{\text{unidad}} \times \frac{\$400}{\text{kwh}} \\ &= \$12\ 960\ 000 \end{aligned}$$

Estos \$12 960 000 se podrían haber dedicado a mejoras en planta y proceso.

Algunas probables causas pueden ser:

- Excesivo funcionamiento de los equipos en vacío (al ocurrir las varadas)
- Lubricación inadecuada, lo cual conlleva a mayores consumos de energía.
- Aprietes y ajustes inadecuados en las máquinas, los cuales “frenan” los equipos y demanda mayor consumo de energía.

- Arranque no escalonado de los diferentes equipos de la Planta, lo cual genera demandas-pico que son penalizadas por la empresa de energía.

12.3. Fuentes de información para la elaboración de índices

Dependiendo del tamaño de la empresa, de su nivel organizativo, de si poseen *software* de mantenimiento y aparte de eso corporativo, etc. dependerá de donde se extraiga la información de los indicadores.

En el caso de las grandes empresas que manejan *software* corporativo (numeral 3.2.10) es relativamente simple porque al momento de emitir las Órdenes de trabajo se les anexa un vale de almacén con los elementos a consumir (con sus cantidades y costos), y al finalizar el mes o el año, se bloquea temporalmente el *software*, y contablemente se corre un *query* o consulta, que dependiendo de cómo haya sido configurado puede hasta entregar los indicadores; en el peor de los casos el *query* entregará valores totales por rubros contables (filtros y lubricantes, consumibles, fundiciones, etc.) y por el lado de mantenimiento se corre un *query* relativo a Órdenes de Trabajo (tipos, cantidades). Con la anterior información se elaboran y presentan fácilmente los indicadores.

En el caso de las medianas empresas el asunto es más complejo porque o no tienen *software* de mantenimiento o el que tienen regularmente no está ligado a la información contable, por lo tanto es necesario pedir al departamento de Contabilidad que emita los informes respectivos, compararlos con los reportes de mantenimiento (*¡Que regularmente no se corresponden!*), conciliar la información, consultar lo referente a mantenimiento (Órdenes de Trabajo, tipos, cantidades) y proceder a construir y presentar los indicadores.

En el caso de las pequeñas empresas es mucho más compleja la situación, porque usualmente la poca cultura organizacional que poseen no llega al nivel de manejar indicadores, y en caso contrario, los administradores de mantenimiento regularmente no poseen información sistematizada o la tienen muy incompleta o parcializada, por lo tanto, los pocos indicadores que se construyen *se hacen a mano* y regularmente dejan muchas dudas de su veracidad.

12.4. Algunos indicadores de producción relacionados con mantenimiento

En la práctica de la profesión es normal y necesario el relacionar variables de producción y de operación de las máquinas/equipos, que aunque no tienen que ver de manera directa con Mantenimiento, sí pueden mostrar de manera indirecta que hay problemas en la gestión y ejecución del Mantenimiento; dichos indicadores tienen que ver con el rendimiento de partes de desgaste, partes de recambio, combustibles

y consumibles, en relación con las unidades producidas.

12.4.1. Partes de desgaste P. D.

Las P. D. son cualquier parte o componente que es susceptible de ser reemplazada debido a su normal (o anormal) desgaste. Se entiende aquí el *desgaste* como pérdida de espesor, peso, forma, dimensiones, etc., durante la operación del equipo, debido a que la P.D. está en contacto con el producto que transita por el equipo. Ej. Cuchillas, troqueles, matrices, placas de fundición, revestimientos, láminas de desgaste, dientes de balde retro/cargador/buldócer, llantas, etc.

Para el control de estos elementos se manejan cuadros del estilo de la tabla 53, la cual regularmente no se basa en horas laboradas, sino en unidades producidas o en distancia recorridas, para el caso de equipo móvil.

Tabla 53. Cuadro para control de partes de desgaste

Nombre Parte de desgaste a controlar: P.D. 1					
Fecha último cambio	km ó unidades producidas al último cambio (a)	Fecha nuevo cambio	km o unidades producidas al cambio actual (b)	Rendimiento (b) – (a)	Observaciones

Con el diligenciamiento del cuadro anterior se llega al establecimiento de estándares de rendimiento, que, en determinado momento, pueden mostrar problemas de calidad de la P.D., de montaje, de operación de la máquina, problemas con la materia prima, entre otros.

12.4.2. Partes de recambio

Una parte de recambio es cualquier parte o componente que es susceptible de ser reemplazada debido a su normal (¡o anormal!) deterioro durante la operación del equipo. Se debe entender que a diferencia de las P. D. las partes de recambio no están en contacto con el producto que transita por el equipo, Ejemplos: Rodamientos, sellos, acoples, repuestos máquina, etc. Para su control se puede conformar un cuadro similar al mostrado en la tabla 53.

12.4.3. Combustibles

Lo que se pretende es llevar un control de consumo de combustibles (diesel, gasolina, coque, gas, etc.) versus unidades producidas o distancias recorridas. De igual manera a lo que sucede con el control de P.D., el alcanzar un estándar de consumo de combustible y observar desviaciones alrededor de dicho valor

permite rápidamente entrar a determinar problemas de Mantenimiento, de operación, de deterioro de los equipos, de hurto, etc. Para este control se puede tomar como base un cuadro como el presentado en la Tabla 54.

12.5. Índices de fallas

Los índices de fallas son herramientas utilizadas en Mantenimiento para estudiar y analizar situaciones problemáticas, generalmente problemas repetitivos a los cuales no se les ha encontrado su origen o causa última o causa raíz. Los Índices de Fallas más conocidos son: Análisis de Pareto, Diagrama Causa – Efecto o de Ishikawa o de Espina de Pescado.

Tabla 54. Cuadro para control de consumo de combustibles

Equipo para controlar:			Mes o período:	
Consecutivo Tanqueo	Fecha tanqueo	Cantidad tanqueada T_i	km o unidades producidas entre tanqueos km	Observaciones
1		$V(km)_1$	$S(km)_1$	
...				
N		$V(km)_N$	$S(km)_N$	
	Volumen total tanqueo mes V_i		Espacio total recorrido S_{rec} $S_{rec} = km_N - km_1$	Rendimiento R $R = \frac{S_{rec}}{V_t}$
	$V_t = \sum_{i=1}^N V_i$			

12.5.1. Análisis de Pareto

Vilfredo Pareto (1848 – 1923) fue un sociólogo y economista italiano, quién aplicó la formulación matemática a la teoría económica y dio a la sociología una metodología positivista. El nombre de *Diagrama de Pareto* fue dado por *Joseph Juran* en honor al economista *Pareto*, quien realizó un estudio sobre la distribución de la riqueza, en el cual descubrió que la minoría de la población poseía la mayor parte de la riqueza y la mayoría de la población poseía la menor parte de la riqueza. Con esto estableció la llamada “Ley de Pareto” según la cual la desigualdad económica es inevitable en cualquier sociedad.

Juran aplicó este concepto a la calidad, obteniéndose lo que hoy se conoce como la regla 80/20. Según este concepto, si se tiene un problema con muchas causas, se puede decir que el 20% de las causas resuelven el 80% del problema y el 80% de las causas solo resuelven el 20% del problema. Por lo tanto, el Análisis de Pareto es una técnica que separa los “pocos vitales” de los “muchos triviales”. Una gráfica

de Pareto es utilizada para separar gráficamente los aspectos significativos de un problema de los triviales (pocos vitales, muchos triviales), de manera que el equipo de trabajo sepa hacia dónde dirigir sus esfuerzos para mejorar.

Algunos ejemplos de tales minorías vitales son:

- La minoría de devoluciones que representa la mayoría de las quejas de la clientela.
- La minoría de compradores que representen la mayoría de las ventas.
- La minoría de productos, procesos, o características de la calidad causantes del grueso de desperdicio o de los costos de reproceso.
- La minoría de vendedores que está vinculado a la mayoría de las partes impugnadas.
- La minoría de problemas causantes del grueso del retraso de un proceso.
- La minoría de productos o servicios 20% que representan la mayoría 80% de las ganancias obtenidas (esta es la razón por la cual la mayoría de los negocios solo venden *lo de moda* o lo “de combate” y lo demás es difícil y costoso conseguirlo).
- La minoría de elementos 20% que representan al grueso (80%) del costo de un inventario.

Se recomienda el uso del Diagrama de Pareto para:

- Identificar oportunidades de mejora
- Mejorar la calidad de un producto o servicio.
- Analizar las diferentes agrupaciones de datos.
- Buscar las causas principales de los problemas y establecer la prioridad de las soluciones.
- Evaluar los resultados de los cambios efectuados a un proceso (el antes y el después).
- Cuando los datos puedan clasificarse en categorías y el rango de cada categoría es importante.

En el caso de Mantenimiento el análisis de Pareto establece que unas pocas causas

claves, son las responsables de la mayoría de los problemas, o en otras palabras “*El 80% de las fallas de una máquina se concentra en el 20% de las partes de la misma*”. Si se corrigen esas causas “*claves*”, se tiene más probabilidad de éxito en la gestión de Mantenimiento.

Para ejecutar un análisis de Pareto se procede de la siguiente manera:

1) Se establecen las frecuencias de las distintas causas que originan el problema (uso de estadísticas de falla).

2) Se jerarquizan los porcentajes de las causas, desde el más alto valor al menor y se calcula además el porcentaje acumulativo (que es el primer porcentaje más el segundo, el tercero más el segundo y el primero y así sucesivamente).

3) En el eje horizontal X se representan las diferentes causas, de mayor a menor frecuencia.

4) En el eje vertical Y se representan los porcentajes individuales de 0% a 100%.

5) Se construye una gráfica de barras (histograma), basada en dichos porcentajes. El ancho de cada barra no es importante, pero debe ser el mismo para todas las categorías.

6) Se construye una curva con los *porcentajes acumulativos*, la cual iniciará en 0% y culminará en 100%, justo encima del punto central de la última barra de histograma.

7) Se traza una línea horizontal desde el 80% en el eje Y, y cuando corte la curva de *porcentaje acumulativo*, se baja hasta el eje X. A la izquierda de esta línea se tendrán las causas importantes (originadas en el 20% de las partes importantes) y a la derecha se tendrán las causas triviales (originadas en el 80% de las partes no importantes).

8) Analizar los pocos vitales y tomar acciones

Ejemplo:

Análisis de paros en sala Calderas.

Un estudio de paros no programados ocurridos en una sala de calderas compuesta de 10 calderas, fue ejecutado a lo largo de seis meses de operación 43 200 horas de las mismas, arrojo los resultados condensados en la Tabla 55.

Tabla 55. Resultado seguimiento fallas en calderas. Tomado de [2]

Fallas	N° de fallas
En quemadores	120
Controles de nivel de agua	90
Bombas de agua	36
Instrumentación	21
Líneas de combustible	21
Hogar	12

La información presentada en la Tabla 55 es fácilmente asequible en un departamento de mantenimiento. La Tabla 56 condensa el paso 2 y la información previa para ejecutar el paso 6 de la metodología propuesta. El análisis de Pareto arroja el gráfico mostrado en la Figura 174, en donde se aprecia que el 80% de las fallas se generan en las categorías A, B y parte de la C, es decir, los quemadores, los controles de nivel de agua y en las bombas de agua, con lo que queda muy claro que serían en estos subsistemas donde el departamento de Mantenimiento deberá hacer un trabajo fuerte de análisis y correcciones.

En general, reducir los problemas más significativos (las barras más largas en una Gráfica Pareto) servirá más para una mejora general que reducir los más pequeños. Con frecuencia, un aspecto tendrá el 80% de los problemas. En el resto de los casos, entre dos y tres aspectos serán responsables por el 80% de los problemas; sí ha ocurrido en el presente ejemplo. En relación con los estilos gerenciales de Resolución de Problemas y Toma de Decisiones, se puede ver como la utilización de esta herramienta puede resultar una alternativa excelente para un “Gerente estilo Bombero”, quien constantemente a la hora de resolver problemas sólo “apaga incendios”, es decir, pone todo su esfuerzo en los “muchos triviales”.

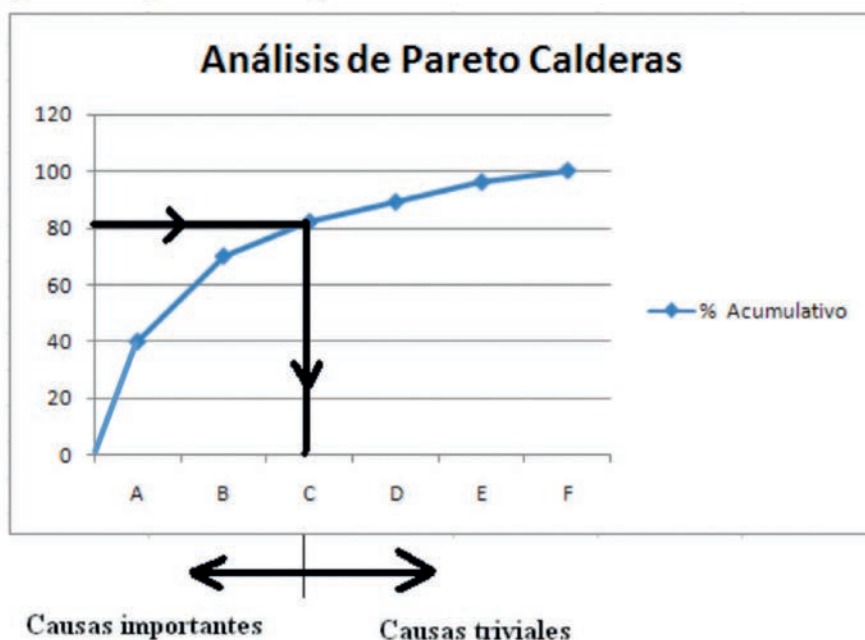
Tabla 56. Categorización y cálculo de porcentajes acumulativos

Categorías	Fallas	N° de fallas	% respecto total	Cálculo % acumulativo
A	Quemadores	120	40%	0% + 40%= 40%
B	Controles de nivel de agua	90	30%	40% + 30%= 70%
C	Bombas de agua	36	12%	70% + 12%= 82%
D	Instrumentación	21	7%	82% + 7%= 89%
E	Líneas de combustible	21	7%	89% + 7%= 96%
F	Hogar	12	4%	96% + 4%= 100%

Para muchos lectores podrá parecer muy simple y hasta trivial el análisis de Pareto, pero es prudente recordar que cuando se labora en la industria, la carga de trabajo del *día a día* (informes por entregar, un correo electrónico por responder, proveedores que atender, visitas a la planta, etc.) puede llegar a ser muy asfixiante y una herramienta como la mostrada será de gran ayuda.

Un análisis de Pareto se puede complementar si se desea con un análisis del tipo diagrama de Ishikawa o espina de pescado o 5M (numeral 12.5.2), el cual permitirá determinar la causa última de las causas vitales.

Figura 173. Diagrama de Pareto para fallas en salas de calderas



12.5.2. El Diagrama de Causa – Efecto, o Diagrama de Ishikawa o Espina de Pescado o de las 5M

Es una herramienta que permite identificar las causas-raíz (causas últimas) de un problema, bien sea en un proceso productivo, en una máquina/equipo o en una empresa prestadora de servicios. El Diagrama causa-efecto permite ubicar las causas raíz de un problema, en función de la partición (de manera lógica y concisa) de los diferentes factores que intervienen en el proceso.

El Diagrama causa-efecto sirve para resolver problemas de Ingeniería tales como:

- Baja productividad de los trabajadores.
- Excesivo tiempo muerto.
- Excesivo ausentismo.
- Excesivos errores en el registro de datos.
- Daños, fallas y reparaciones repetitivas.
- Trabajos pendientes.

Su esencia se basa en la premisa de que en un problema en un proceso productivo puede tener unas causas principales o mayores, representadas en:

- **Maquinaria**
- **Mano de Obra**
- **Método**
- **Materia prima**
- **Metrología**

El aporte de cada ítem es el siguiente:

Maquinaria. Representa todo lo que tiene que ver con la máquina/equipo en sí, es decir, mal elegido, mal alistado, en mal estado, mal calibrado, mal ajustado, mal programado, etc.

Mano de obra. Hace referencia al Ser, es decir, a la persona: su estado de ánimo, el ambiente laboral, su *Actitud* frente al trabajo.

Método. Estudia la *forma en que se hacen las cosas*. Depende mucho de la capacitación y de la formación del operario y no con la actitud (la cual se valora en Mano de Obra).

Materia prima o Materiales. Estudia el aporte de la materia prima, por ejemplo, materia prima mal seleccionada, en mal estado, por fuera de parámetros, mal dimensionada, etc.

Metrología. Analiza el aporte que hacen los instrumentos de medición en el problema en estudio. Mal seleccionado, en mal estado, mal utilizado, Mal ajustado, mal calibrado, etc.

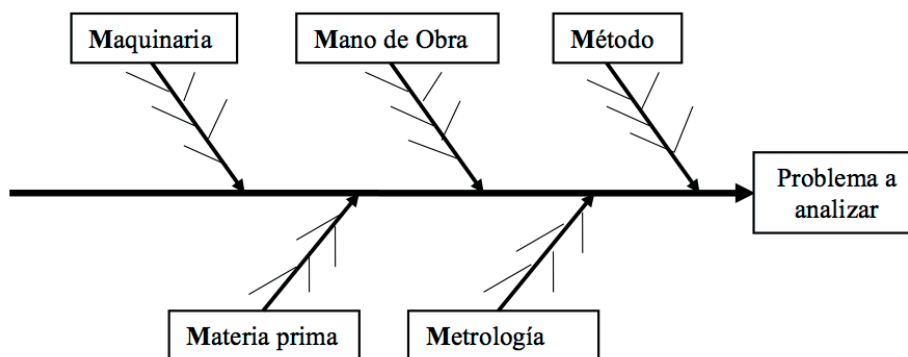
El Diagrama causa-efecto consta de encabezado y espina de pescado.

Encabezado: Título, Fecha de realización, Área de la Empresa, Integrantes del equipo de estudio.

Espina de pescado (Figura 175):

- **Rectángulo principal**, se ubica a la derecha del diagrama, y allí se escribe el problema, la característica de calidad o defecto a estudiar.
- **Línea Principal** o espina central (columna vertebral).
- **Líneas inclinadas** que llegan a la línea central. Enlazan las *causas mayores* con la *línea principal*.
- **Rectángulos secundarios**, en los extremos de las líneas inclinadas. En estos se escriben las *causas mayores* que tienen relación sobre el efecto estudiado.
- **Líneas secundarias (espinas)**. Dan cuenta de cada una de las *causas menores* que provocan la *causa mayor*.

Figura 174. Diagrama de Ishikawa o Espina de pescado



Es importante aclarar que, regularmente, la aplicación del Diagrama causa-efecto debe ser hecha por un equipo multidisciplinario (producción, Mantenimiento, Administración, Recursos humanos, Seguridad Industrial, Salud ocupacional, etc.), puesto que se tocan diferentes aspectos técnicos, administrativos, personales, económicos, etc., y el análisis podría quedar sesgado si por ejemplo un funcionario técnico analiza aspectos personales o un administrador analiza y decide sobre aspectos técnicos.

El método consiste en desagregar el problema hasta determinar la causa (o causas) que lo están provocando; a esta causa se le llama *causa raíz*. A partir de

la configuración mostrada en la Figura 175 se comienza a desglosar cada una de las *causas mayores*, colocando líneas o flechas secundarias con *causas menores*. A partir de este análisis se puede llegar a determinar cuál es el peso de cada una de las *causas mayores y menores* en el problema estudiado. Una vez determinadas las causas raíz de un problema, es necesario entrar a plantear soluciones, implementarlas y, posteriormente, realizar mediciones que permitan validar el efecto de las correcciones.

Una misma *causa menor* puede estar aportando en varias líneas inclinadas de *causas mayores*. Por ejemplo, un instrumento de medición mal seleccionado aportará en la causa mayor *Metrología*, pero también deberá aparecer en la causa mayor *Método*, si es verificable que el operario estaba mal capacitado para elegir el instrumento, y si además el operario tenía mala actitud (por ejemplo, por una calamidad doméstica) entonces aparecerá también en *Mano de obra*.

Una variante del Diagrama de Ishikawa es su aplicación al sector servicios, en donde ya no se habla de 5M, sino de 5P (en Inglés), es decir, Personal (*Personal*), Provisiones (*Provisions*), Procedimientos (*Procedures*), Puestos (*Position*) y Clientes (*Purchaser*).

Tomando como base el ejemplo desarrollado en el numeral 12.5.1 en donde la causa más importante resultó ser los *Quemadores*, el diagrama de Ishikawa respectivo podría resultar en:

- **Maquinaria.** Quemadores mal seleccionados para el gasto o tipo y cantidad de combustible utilizado.
- **Mano de Obra.** Operario desmotivado que no pone a punto los quemadores.
- **Método.** Mala capacitación del personal encargado de seleccionar, operar y mantener los quemadores.
- **Materia prima.** Quemadores de mala calidad o con materiales inadecuados para el tipo de combustible a quemar.
- **Metrología.** Quemadores mal calibrados

En una hipotética situación real, y suponiendo que el equipo de trabajo determinó que en definitiva los quemadores estuvieron mal seleccionados, esta sería la *causa raíz* del problema, y una posible solución podría ser brindar una capacitación al jefe de mantenimiento sobre *selección de quemadores*, y que trabaje coordinadamente con el departamento de compras, al momento de elegir los próximos quemadores.

12.6. Preguntas de consulta o análisis y ejercicios propuestos

- ¿Será posible que el Control de partes de desgaste arroje información sobre defectos en la materia prima utilizada en el proceso? Explique.
- Consulte sobre la composición y principio de operación de una trituradora de mandíbulas para molienda de piedra. Explique cómo se podría llevar un control del rendimiento de la mandíbula fija y la mandíbula móvil.
- **Ejercicio propuesto.** Un fabricante de Refrigeradores desea analizar cuáles son las categorías de los defectos más frecuentes que aparecen en las unidades que salen de la línea de producción. Para esto, empezó por clasificar todos los defectos posibles en sus diversos tipos, para el período correspondiente a *julio/2019* y los resultados aparecen en la tabla 57.

Se propone aplicar el análisis de Pareto, para determinar las causas importantes y las triviales. Hacer uso de hoja electrónica Excel y elaborar un gráfico en Excel como el mostrado en la Figura 174.

Tabla 57. Tipos de fallas y frecuencias para refrigeradores. Tomado de [101]

Empaque Defecto	Empaque roto o deforme que no ajusta	9	
Pintura Defecto	Defectos de pintura en superficies externas	5	
Gavetas defecto.	Gavetas interiores con rajaduras	1	
Mala Nivelación	La heladera se balancea y no se puede nivelar	1	
Motor no arranca	El motor no arranca después de ciclo de parada	1	
Motor no detiene	No para el motor cuando alcanza Temperatura	36	
No enfría	El motor arranca, pero la heladera no enfría	27	
No funciona	Al enchufar no arranca el motor	2	
Otros	Otros Defectos no incluidos en los anteriores	0	
Puerta no cierra	La puerta no cierra correctamente	2	
Rayas	Rayas en las superficies externas	4	
Total:		88	

- **Ejercicio propuesto.** Elaborar el Diagrama de Ishikawa para la categoría B: Control de nivel de agua en calderas, del ejemplo mostrado en el numeral 12.5.1.+

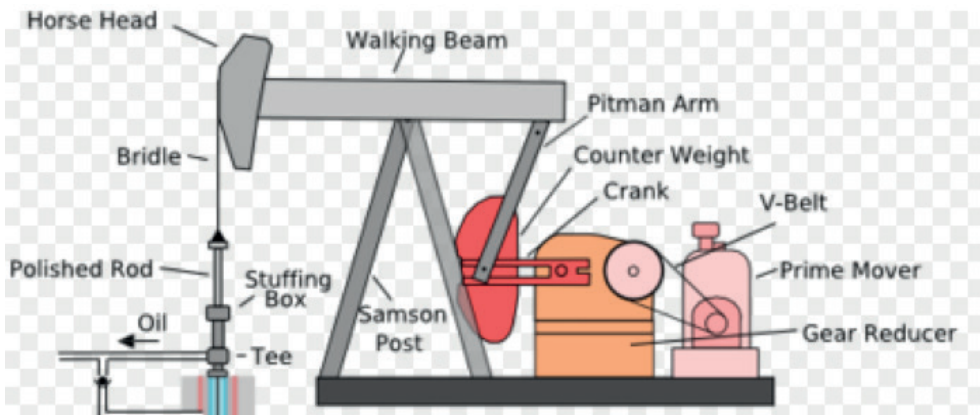
12.7. Para reflexionar. Un estudio de caso en la empresa colombiana de petróleos Ecopetrol

La Agencia Nacional de Hidrocarburos de Colombia ANH es el ente que en actualidad se encarga de las tareas de exploración y explotación de hidrocarburos, su posterior refinación y entrega a los distribuidores y de la regulación del mercado, en todo el territorio nacional. Anterior a 2003, la ANH no existía y, en su lugar, estaba *Ecopetrol*, Empresa Colombiana de Petróleos, que cumplía doble función, compañía petrolera, administradora y reguladora del recurso petrolero del País. Dentro de la estructura de La ANH, Ecopetrol siguió existiendo, pero concentrada en labores como compañía petrolera. Ecopetrol es la empresa más grande del país, en la gran mayoría de aspectos (económicos, de infraestructura, cantidad de personal, etc.). Una empresa del tamaño mencionado requiere de una infraestructura administrativa robusta debido a las múltiples tareas que debe atender, en sus múltiples frentes de trabajo. En las empresas con estructuras administrativas robustas es típico que los diferentes departamentos no se comuniquen entre sí, llegando al caso extremo de que sin querer se entorpecen las labores, ya que como se dice en lenguaje coloquial cada departamento se dedica a *mirar el árbol que tiene al frente, pero no ven el bosque completo*.

La situación que se describirá a renglón seguido ocurrió a mediados de la década de 1990, y explica un problema repetitivo de mantenimiento que se presentó en Ecopetrol, en una cantidad representativa de unidades de bombeo, la cual fue resuelta aplicando la Espina de Pescado o diagrama de Ishikawa. La descripción completa del problema se puede consultar en la referencia [102].

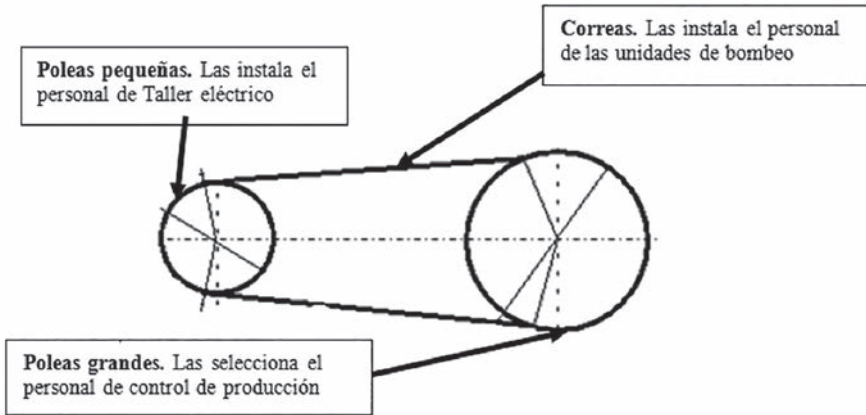
La Figura 175 ilustra el esquema básico de una estación de bombeo petrolera, la cual opera bajo del *principio de bomba impelente de pistón*. Se aprecia la unidad motriz (*prime mover*), la transmisión por correas (*V-belt*), el reductor de velocidad (*gear reducer*) y el mecanismo convertidor de movimiento rotacional en movimiento rectilíneo alternativo (*crank, counter weight, pitman beam, horse head, bridle*) que finalmente proporciona la acción impelente destinada a extraer el crudo. La relación de transmisión del sistema de correas debe ser variable en función de las condiciones cambiantes de producción en cada pozo petrolero, es decir dependiendo del número de carreras/minuto requerido se debe modificar la relación de transmisión.

Figura 175. Unidad de bombeo típica utilizada para extraer petróleo
Tomado de [102]



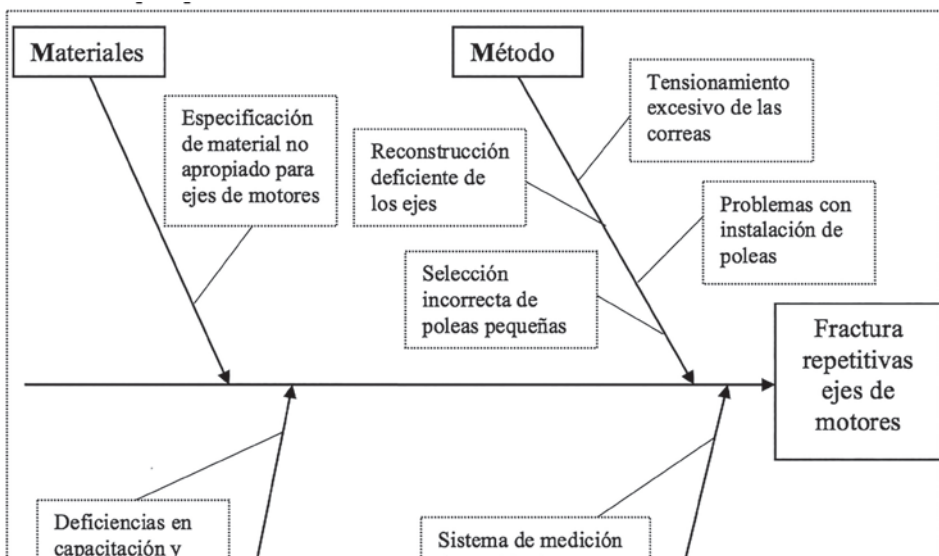
A mediados de la década del 1990, las estadísticas mostraron un aumento desproporcionado de roturas de los ejes de salida de los motores eléctricos (*primer mover*), es decir aumento de *fallas funcionales* con las consiguientes consecuencias que ello acarrea (ver numeral 1.3.1). En ese momento histórico de Ecopetrol tareas en apariencia muy simples como la selección, instalación y mantenimiento de una transmisión por correas eran atendidas por al menos tres diferentes cuadrillas de personal, tal como se muestra en la Figura 176).

Figura 176. Unidades que intervienen en el sistema de transmisiones por polea y correa Tomado de [102]



La situación de roturas de ejes de los motores llegó a ser tan crítica que fue necesario crear un equipo de trabajo con el fin de darle solución a esta problemática; el equipo de trabajo se basó en un *Modelo de gestión de Análisis de fallas* [102], desarrollado al interior de Ecopetrol. Luego de un arduo trabajo, capacitaciones, seminarios, análisis y conclusiones, la aplicación del *Modelo de gestión de Análisis de fallas* llegó a la elaboración del diagrama de Ishikawa mostrado en la Figura 177, en donde intervienen cuatro *causas mayores* y siete *causas menores*.

Figura 177 Diagrama de Ishikawa o Causa - Efecto para fractura de ejes
Tomado de [102]



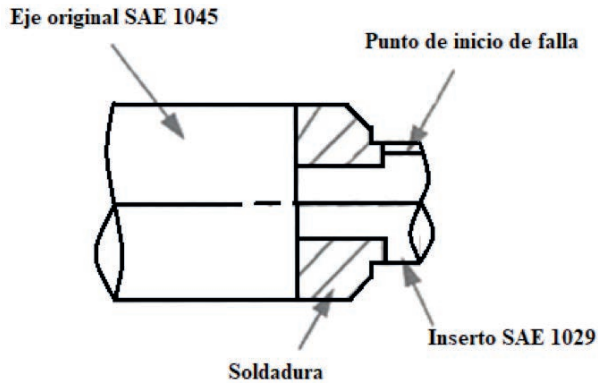
La explicación completa del diagrama de Ishikawa elaborado se puede consultar en la referencia [102], no obstante, aquí se hará un recuento secuencial de las pesquisas y análisis que llevaron a su construcción.

¿Por qué se rompían los ejes?

Se realizó un análisis fractográfico en laboratorio (inspección visual, análisis de composición química y metalográfico, pruebas de dureza, macrofotografía de la superficie de rotura y análisis fractográfico).

Este análisis arrojó que los ejes de los motores se fracturaban porque se les practicaba una modificación en el sitio de instalación de la polea pequeña, consistente en alargarlos (ver Figura 178), perforándolos en su sección central y adicionando un trozo de eje nuevo con espigo, el cual se aseguraba con soldadura, se cilindraba de nuevo y por último se le mecanizaba el cuñero para asegurar la polea pequeña. Este tipo de reparación es común en muchos ámbitos, pero ¿Por qué fallaba en Ecopetrol? Los análisis arrojaron que el eje original era SAE 1045 mientras que el trozo de eje adicionado era SAE 1029 (soldadura de materiales un tanto disímiles), los cambios de sección del espigo eran rectos generando concentrador de esfuerzos y por último el cuñero mecanizado en la sección reparada presentaba geometría no uniforme (más profundo en un extremo que en otro y no paralelo a la flecha del eje). Todo este cúmulo de factores generaba una *fractura dúctil de rápida propagación*.

Figura 178. Diagrama esquemático de reparación ejes motores eléctricos
Tomado de [102]



Como un agravante adicional se determinó que el personal de bombeo encargado de tensionar las correas las tensionaba demasiado, es decir, no manejaban un procedimiento adecuado para determinar la tensión adecuada (en función de distancias entre centros y tamaño de poleas principalmente).

Aparentemente, el análisis no debería parecer muy complejo, pero es necesario recordar al lector que fue necesario poner a trabajar coordinadamente tres departamentos que no lo hacían normalmente. Estos resultados obligaron replantear métodos de ejecución de las reparaciones, previas capacitaciones y actualizaciones al personal interviniente.

Ahora bien, la pregunta de rigor subsecuente sería: **¿Por qué era necesario alargar los ejes?**

La unidad de control de producción ordenaba desde hace algunos años la modificación de los extremos de los ejes de los motores eléctricos, con el fin de poder instalar poleas pequeñas, de *fabricación especial* (no estandarizadas), con el fin de obtener unas carreras/minuto, acordes a las condiciones de los pozos. Cabe recordar que las poleas para correas en V pertenecen a una familia de elementos estandarizados que con muy raras excepciones obedecen a fabricaciones especiales.

Es importante mencionar una situación usual en las empresas, consistente en que al estar un personal vinculado durante cierto tiempo ocurre un proceso de *adaptación al transcurrir de los hechos*, que suaviza el espíritu crítico y lleva a manifestar expresiones mágicas como “*hace tiempos que lo hacemos así*” o “*siempre lo hemos hecho así...*” La búsqueda del *Equipo de Gestión de Análisis de falla* llevó a determinar que las modificaciones de los ejes de los motores se originaron en una tabla suministrada años atrás por el Departamento de Ingeniería Eléctrica (¡un nuevo actor en el problema!).

Siendo anormal el asunto de fabricar poleas pequeñas especiales y alargar ejes, el *Equipo de Gestión* realizó estudios y comparó la tabla “antigua” con

tablas de Libros de Diseño y con catálogos de fabricantes, encontrando que los tamaños mínimos que ella recomendaba estaban por debajo de los límites prescritos por la bibliografía especializada, lo que obligaba a fabricarlas *más anchas y más pequeñas*.

- ¿Cómo influye la variación del ancho de la polea pequeña?

De fábrica el eje de un motor eléctrico posee una longitud tal que garantiza que el momento flector *real* no superará el momento flector *de diseño*; al alargar el eje como lo hacían en Ecopetrol, la fuerza resultante ejercida por la polea pequeña se aleja del apoyo (rodamiento lado polea), aumentando el voladizo con lo cual el momento flector real supera el momento flector de diseño llevando finalmente a la fatiga al eje.

- ¿Cuáles fueron las causas-raíz del problema?

En conclusión, la combinación de factores técnicos y administrativos propició la ocurrencia de una falla que en una pequeña empresa podría haberse resuelto de una manera muy simple; entre los factores técnicos se tienen: selección inadecuada de poleas, alargamiento de ejes con un procedimiento de reparación inadecuado y excesiva tensión en las correas y el factor administrativo consistió en la falta de comunicación y de sinergia entre los diferentes equipos de trabajo. Este es un caso extremo, de una situación típica que ocurre en empresas con estructuras administrativas robustas. Pasaron dos años antes de llegar a las causas-raíz del problema.

Las soluciones de fondo llegaron de la mano de las siguientes acciones:

- Eliminar las modificaciones de ejes.
- Modificar las transmisiones por correas a valores recomendados por los expertos, es decir, llevar el tamaño de la polea pequeña al mínimo recomendado, aumentar el tamaño de la polea grande y modificar el tamaño de las correas, con el fin de conservar la relación de transmisión requerida.
- Comenzar a implementar los variadores de frecuencia, que en ese tiempo habían comenzado a incursionar en el mercado colombiano.
- Adicionalmente, se inició un proceso paulatino de trabajo cooperativo en Ecopetrol, con el fin de que unificar esfuerzos de los diferentes departamentos y dejar de trabajar como islas.

CAPÍTULO TRECE

Programación de tareas en mantenimiento

13.1. Introducción

En los numerales 3.2.5, 3.2.6 y 3.2.7 se ilustraron los procedimientos para la definición de los listados de requerimientos de mantenimiento o *Listados LEMI*, la elaboración de los *Instructivos de Mantenimiento* y la conformación de los *Tableros de Control*; estos Tableros de control son preliminares, puesto que no tienen en cuenta la disponibilidad de recursos de la empresa y los tiempos en los cuales se puede detener el proceso productivo para ejecutar las tareas planteadas. En este orden de ideas, hay que complementar los Tableros de control preliminares con procesos de *Programación*, fundamentales en Mantenimiento, puesto que permiten racionalizar (balancear) recursos y reducir costos, en función de las actividades a realizar, del tiempo en que se puede intervenir las máquinas/equipos y de los recursos existentes en la empresa.

13.2. La programación del Mantenimiento

Se entiende por *Programación en Mantenimiento* al conjunto de acciones tendientes a organizar la ejecución de un conjunto de tareas en un periodo de tiempo generalmente preestablecido, distribuyéndolas, con el fin de racionalizar los recursos (humanos, repuestos, herramientas). Para efectuar la programación en Mantenimiento es necesario tener en cuenta tres variables: el tiempo programable para mantenimiento TPPM, la Carga de trabajo de mantenimiento CTM y los Recursos (Capacidad del departamento de Mantenimiento).

13.2.1. Tiempo Programable Para Mantenimiento TPPM

Se llama así a los lapsos en los cuales se puede intervenir sobre las máquinas/equipos, sin afectar el ritmo normal de producción. Recuérdese que las máquinas/equipos deben estar prioritariamente en producción, y que no puede ser intervenidas a cualquier momento; por ejemplo, hay máquinas que trabajan tres turnos y solo podrían ser intervenidas los fines de semana o en los cambios de turnos. En general, el TPPM se ubicará en:

- Noches, dominicales o festivos
- Lapsos entre cambios de turno
- Lapsos de alistamiento de las máquinas para hacer cambios de referencia en la producción.
- Períodos entre cosechas

13.2.2. Carga de trabajo programable o Carga de trabajo de mantenimiento CTM

La CTM es la suma de tiempos que se emplearían para ejecutar las tareas de Mantenimiento. La CTM consta de dos categorías principales:

Mantenimiento programado o planeado

- Mantenimiento de rutina o preventivo (los tiempos salen de los instructivos asociados al LEMI)
- Mantenimiento correctivo programado
- Reparaciones generales programadas, que impliquen paro de la planta (*overhaul*).

Mantenimiento correctivo de emergencia

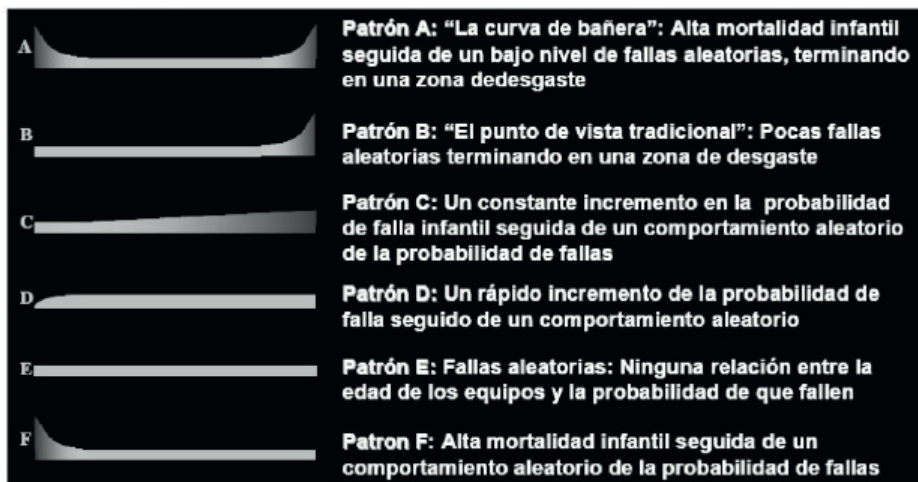
Depende principalmente de un patrón de fallas.

La Figura 179 ilustra algunos comportamientos típicos de patrones de falla, los cuales están asociados a la tecnología de fabricación de la máquina/equipo (ver *numeral 1.7*) y a la forma como se administre el mantenimiento.

13.2.3. Recursos

En el contexto de Programación de mantenimiento, los Recursos se materializan en el personal, herramientas, insumos, repuestos, equipos de apoyo, etc., necesarios para la ejecución de la CTM. Dada la amplia diversidad de recursos físicos en las diferentes empresas y la dificultad que encarna tenerlos en cuenta, en el presente capítulo como *Recursos* se entenderán los Humanos, representados en horas-hombre, y se asumirá que los recursos físicos son suficientes. La programación consiste entonces en racionalizar los *Recursos* con miras a ejecutar la *Carga de trabajo programable CTM*, dentro del *Tiempo programable TPPM*. La racionalización se lleva a cabo aplicando un proceso de *Balanceo* del Tablero de control preliminar. En el presente capítulo se explicará el procedimiento para balancear *Tableros de control por tiempo transcurrido*.

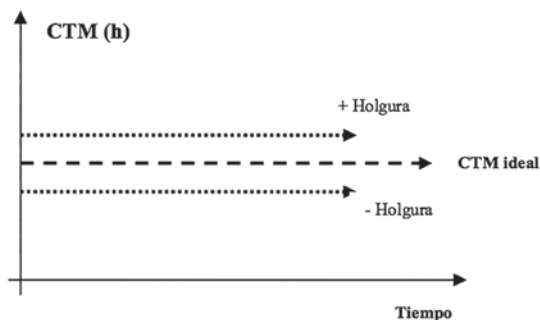
Figura 179. Comportamiento de algunos patrones de Falla
Tomado de [104]



13.2.4. Balanceo de un Tablero de control

El *Balanceo del Tablero de control* consiste en trasladar actividades de una semana a otra, hacia la izquierda o hacia la derecha, con el fin de tratar de mantener una *Carga de trabajo de mantenimiento CTM* aproximadamente constante, evitando al máximo generar horas extras, turnos adicionales y *outsourcing* (trabajo contratado externamente) para ejecutar la CTM. En otras palabras, la CTM debe mostrar un comportamiento ideal como el descrito en la Figura 180, lo cual está en relación con los Recursos y el TPPM. Las tareas que se muevan a la izquierda de la semana de referencia se *adelantarán*, y las tareas que se muevan a la derecha se *atrasarán*.

Figura 180. Comportamiento ideal de la Carga de Trabajo de Mantenimiento CTM versus tiempo transcurrido



Método teórico para balancear un Tablero de control por tiempo trascurrido.

En este caso no se tienen en cuenta los Recursos ni el TPPM. Este tipo de balanceo es más de carácter informativo, para dar una idea general de CTM total y por semana. Los pasos generales son:

- a. Determinar la CTM para cada semana.
- b. Determinar la media aritmética semanal de la CTM.
- c. Determinar las CTM semanales teóricas máximas y mínimas, sumando y restando un 10% de su valor, a la media aritmética calculada.
- d. Mover horas de actividades hacia la derecha o hacia la izquierda, tratando que la diferencia entre las cargas de trabajo máxima y mínima *finales* no superen el +/- 10% calculado. No es recomendable adelantar o atrasar actividades por un período superior a una semana.
- e. Efectuar un costeo básico (ver *Capítulo 18*)

Ejemplo de Balanceo teórico de un Tablero de control

La Tabla 58 muestra un Tablero de control, en el cual se han considerado solamente tareas y tiempos de mantenimiento planeado (listado de requerimientos LEMI). La tabla 58 es el resultado de efectuar el *Paso a* de la metodología.

Paso b:

Carga de mantenimiento (6) semanas = 75h 5min = 75,08h

Media aritmética semanal de carga de mantenimiento = 12h 31min = 12,51h

Tabla 58. Tablero de control anual. Tomado de [1]

Semanas	1	2	3	4	...	51	52
Máquinas							
Manejadora	L - 01 1h 20 min	E - 17 2h 40 min	L - 02 1h 30 min	L - 10 0h 40 min	...	L - 01 1h 20 min	M - 15 3h 40 min
	L - 12 2h 30 min		E - 23 1h 50 min		...	L - 12 2h 30 min	
	M - 15 3h 40 min				...		
Evaporadora	L - 02 1h 30 min	E - 25 1h 30 min	L - 16 0h 40 min	E - 10 2h 50 min	...	L - 02 1h 30 min	E - 26 0h 50 min
	L - 15 1h 40 min	M - 17 2h 50 min	M - 11 4h 30 min		...	L - 10 0h 40 min	M - 18 3h 40 min
Condensadora	L - 01 1h 20 min	E - 15 2h 30 min	E - 18 3h 10 min	M - 10 8h 50 min	...	L - 01 1h 20 min	M - 22 4h 10 min
	M - 22 4h 10 min				...	M - 20 5h 15 min	E - 31 0h 30 min

Paso c:

CTM teórica máxima = 13h 47min = 13,76h
 CTM teórica mínima = 11h 16min = 11,26h
 Franja +/- 10% entre CTM teor. Máx y CTM teor = 2h 30min = 2,50h

Con respecto a la media aritmética semanal, a la CTM teor. máx y a la CTM teor. mín, cada semana presenta los excesos y las holguras de tiempo presentados en la tabla 59.

Paso d.

Un vistazo rápido de la tabla 59, muestra que las CTM de las semanas 1 y 2 no quedan comprendidas en la franja del +/- 10%. En la semana 1 hay exceso, mientras que hay holgura en la semana 2, y basta con mover la tarea L - 12 (2h 30min) de la semana 1 a la semana 2 para que el Tablero quede balanceado, tal como lo muestran las tablas 60 y 61.

Tabla 59. Holguras y excesos iniciales de la Tabla 56

Semana	CTM	Holgura respecto media aritm.	Exceso respecto media aritm.	Holgura respecto CTM teor. mínima	Exceso respecto CTM teor. máxima
1	16h 10min		3h 39min		2h 25min
2	9h 30min	3h 1min		1h 46min	
3	11h 40min	0h 51min		0h 25min	
4	12h 20min	0h 11min		1h 12min	
.....
51	12h 35min		0h 4min	1h 19min	
52	12h 50min		0h 15min	1h 34min	

Tabla 60. Tablero de control anual balanceado

Manejadora	L - 01 1h 20 min	E - 17 2h 40 min	L - 02 1h 30 min	L - 10 0h 40 min	...	L - 01 1h 20 min	M - 15 3h 40 min
		L - 12 2h 30 min	E - 23 1h 50 min		...	L - 12 2h 30 min	
	M - 15 3h 40 min				...		
Evaporadora	L - 02 1h 30 min	E - 25 1h 30 min	L - 16 0h 40 min	E - 10 2h 50 min	...	L - 02 1h 30 min	E - 26 0h 50 min
	L - 15 1h 40 min	M - 17 2h 50 min	M - 11 4h 30 min		...	L - 10 0h 40 min	M - 18 3h 40 min
Condensadora	L - 01 1h 20 min	E - 15 2h 30 min	E - 18 3h 10 min	M - 10 8h 50 min	...	L - 01 1h 20 min	M - 22 4h 10 min
	M - 22 4h 10 min				...	M - 20 5h 15 min	E - 31 0h 30 min
CTM final	13h 40min	12h 0min	11h 40min	12h 20min	...	12h 35min	12h 50min

Tabla 61. Holguras y excesos finales, a partir de la Tabla 56

Semana	CTM	Holgura respecto media aritm.	Exceso respecto media aritm.	Holgura respecto CTM teor. mínima	Exceso respecto CTM teor. máxima
1	13h 40min		1h 09min	2h 24min	
2	12h 0min	0h 31min		0h 44min	
3	11h 40min	0h 51min		0h 25min	
4	12h 20min	0h 11min		1h 12min	
.....
51	12h 35min		0h 4min	1h 19min	
52	12h 50min		0h 15min	1h 34min	

Las CTM de todas las semanas han quedado comprendidas en la franja del +/- 10 % y como se puede observar, no se han tenido en cuenta ni el TPPM ni los Recursos, de allí el nombre de *Balanceo teórico*.

Método real (heurístico) para balancear un Tablero de control por tiempo transcurrido. En este caso sí se tienen en cuenta. En este caso sí se tienen en cuenta los Recursos y el TPPM. Los pasos generales son:

- a. Determinar el TPPM propio de la empresa
- b. Determinar los recursos (humanos y físicos) que atenderán la CTM. Dada la complejidad de especificar los recursos completos (equipos de apoyo, herramientas, sitios de trabajo, área de trabajo de las máquinas, insumos, etc.), el análisis se simplificará, teniendo en cuenta solo los recursos humanos. Los recursos humanos se definen en función de la estructura del departamento de mantenimiento de la empresa (*Capítulo 2*), si se trabaja con operarios polivalentes (“toderos”) o con cuadrillas u operarios especializados por actividad (o lubricación o electricidad o mecánica). De manera simplificada este proceso conduce a determinar el número de horas-hombre de los ejecutantes de mantenimiento que podrán laborar durante el TPPM, bien sea global o por especialidad.
- c. Determinar la CTM para cada semana, bien sea global o por especialidad.
- d. Determinar la media aritmética de la CTM, bien sea global o por especialidad
- e. Determinar las CTM semanales teóricas máximas y mínimas (global o por especialidad), sumando y restando el 10% a la media aritmética calculada.
- f. Mover *Instructivos o actividades completas* hacia la derecha o hacia la izquierda, tratando que la diferencia entre las cargas de trabajo máxima y mínima *fnales* no superen el +/- 10% calculado. De nuevo, no es recomendable adelantar o atrasar actividades por un período superior a una semana.

g. Validar en cuáles semanas se podrá atender la CTM con el personal propio (con la totalidad o parte de ellos), y en cuáles será necesario pagar personal adicional, por cuánto tiempo y cuánto costará.

h. Efectuar un costeo básico (*ver Capítulo 18*)

Ejemplo de balanceo real de un Tablero de control. Se desarrollará el ejemplo, con base a la misma información de la tabla 58.

Paso a. Se puede detener el proceso productivo los domingos de 6:00 A.M. a 10:00 A. M., es decir TPPM = 4 horas.

Paso b. La empresa posee operarios especializados para los grupos de tareas LEM, es decir, se dispone de 3 ejecutantes y 12 horas-hombre, 4h por cada especialidad. Los operarios están contratados tiempo completo con la empresa, por lo tanto, si van a trabajar los domingos hay que pagarles el recargo dominical respectivo.

Pasos c, d y e. La tabla 62 muestra las CTM por semana y por especialidad, las medias aritméticas de las CTM, por especialidad y las CTM medias teóricas, máximas y mínimas, por especialidad.

Paso f. Continúa el paso más dispendioso de un *Balanceo real*, en el sentido que muchas veces hay tareas cuya duración supera las medias máximas, y no basta con suponer que colocando más gente a trabajar se podrá culminar dentro del TPPM, porque probablemente haya desarmes o rearmes secuenciales y no se podrá reducir la duración total de la tarea, o en otros casos el espacio físico (en las máquinas o sus vecindades) puede ser tan reducido que más gente simplemente querría decir que se estorbarían unos a otros sin aportar a la labor.

Tabla 62. Desarrollo de pasos c, d y e, del Balanceo real

Semanas	1	2	3	4	...	51	52
Paso c							
CTM inicial L	8h 20min 8,33h	0h 0min 0,0h	2h 10min 2,17h	0h 40min 0,67h	...	7h 20min 7,33h	0h 0min 0,0h
CTM inicial E	0h 0min 0,0h	6h 40min 6,67h	5h 0min 5,00h	2h 50min 2,83h	...	0h 0min 0,0h	1h 20min 1,33h
CTM inicial M	7h 50min 7,83h	2h 50min 2,83h	4h 30min 4,50h	8h 50min 8,83h	...	5h 15min 5,25h	11h 30min 11,50h
Paso d							
CTM (6) semanas L: 18h 30min y 18,50h Media CTM L = 3h 5min y 3,08h							
CTM (6) semanas E: 15h 50min y 15,83h Media CTM E = 2h 38min y 2,64h							
CTM (6) semanas M: 40h 45min y 40,75h Media CTM M = 6h 48min y 6,79h							
Paso e							
Media CTM L Máx = 3h 24min y 3,39h; Media CTM L Min = 2h 47min y 2,78h							
Media CTM E Máx = 2h 54min y 2,90h; Media CTM E Min = 2h 23min y 2,38h							
Media CTM M Máx = 7h 28min y 7,47h; Media CTM M Min = 6h 07min y 6,11h							

Se van a balancear primero las tareas de lubricación. La tabla 63 muestra el proceso de cálculo de holguras y excesos de las CTM de cada semana, con respecto a la franja de +/- 10%. Se observa que las semanas 1 y 51 presentan excesos importantes, mientras que las semanas 2 y 52 no tienen tareas de lubricación asignadas, y finalmente las semanas 3 y 4 tienen holguras importantes.

En la secuencia de traslado se pasarán primero tareas de las semanas 4 a la 3 para liberar recursos; seguidamente se pasarán tareas de la semana 1 a la semana 2 y por último, se pasarán tareas de la semana 51 a la 52, tal como lo muestra la tabla 64. Las Tareas de Lubricación se pueden efectuar con el ejecutante de la empresa, sin necesidad de subcontratar personal adicional.

Tabla 63. Proceso de balanceo de las Tareas de lubricación.

Semanas	1	2	3	4	...	51	52
CTM inicial L	8h 20min 8,33h	0h 0min 0,0h	2h 10min 2,17h	0h 40min 0,67h	...	7h 20min 7,33h	0h 0min 0,0h
Exceso respecto a media CTM Máx	4h 56min 4,94h					3h 56min 3,94h	
Holgura respecto a Media CTM Mín		2h 47min 2,78h	0h 37min 0,61h	2h 07min 2,11h			2h 47min 2,78h
Media CTM L Máx = 3h 24min y 3,39h; Media CTM L Mín = 2h 47min y 2,78h							

La tabla 64 es útil porque muestra varios aspectos de la realidad, que muchas veces desde la academia se pasan por alto, pero en el ejercicio real son importantes tenerlos en cuenta. En primer lugar, se ha tratado de seguir la instrucción de respetar las medias CTM máx. y mín. hasta donde ha sido posible, tal como ocurrió en la semana 3. En segundo lugar, la semana 4 se dejó con carga nula, puesto que económicamente a un operador no le justifica ir un domingo a trabajar 1 hora dominical diurna HDD o menos (difícilmente cubriría lo del transporte). En tercer lugar, las semanas 1, 51 y 52 superan la media CTM máx L, pero están dentro del límite del TPPM, puesto que solo se trasladan Tareas completas. En cuarto lugar y como un caso especial, la CTM de la semana 2 supera el TPPM por 20 min, y se constituye en un caso en los cuales es mejor dar un pequeño incentivo al operador para que aumente su rendimiento normal, a cambio de generar más trabajo por 20 min adicionales...

Tabla 64. CTM final para las tareas de lubricación

Semanas	1	2	3	4	...	51	52
Máquinas							
Manejadora		L – 01 1h 20 min	L – 02 1h 30 min		...	L – 01 1h 20 min	
	L – 12 2h 30 min		L – 10 0h 40 min		...	L – 12 2h 30 min	
Evaporadora	L – 02 1h 30 min		L – 16 0h 40 min		...		L – 02 1h 30 min
		L – 15 1h 40 min			...		L – 10 0h 40 min
Condensadora		L – 01 1h 20 min			...		L – 01 1h 20 min
CTM final lubricación	4h 00min 4,00h	4h 20min 4,33h	2h 50min 2,83h	0h 00min 0,00h	...	3h 50min 3,83h	3h 30min 3,50h

El Balanceo de tareas Eléctricas se muestra en las tablas 65 y 66. Se propone al lector su comprensión y análisis respectivo, y determinar si es posible ejecutar las tareas con el electricista de la empresa o si es necesario subcontratar personal adicional y por cuánto tiempo.

Tabla 65. Proceso de balanceo de las Tareas de Electricidad

Semanas	1	2	3	4	...	51	52
CTM inicial E	0h 0min 0,0h	6h 40min 6,67h	5h 0min 5,00h	2h 50min 2,83h	...	0h 0min 0,0h	1h 20min 1,33h
Exceso respecto a media CTM Máx		3h 46min 3,77h	2h 06min 2,10h				
Holgura respecto a Media CTM Mín	2h 23min 2,38h			0h 27min 0,45h		2h 23min 2,38h	1h 03min 1,05h
<i>Media CTM E Máx = 2h 54min y 2,90h; Media CTM E Mín = 2h 23min y 2,38h</i>							

Tabla 66. CTM final para las tareas de Electricidad

Semanas	1	2	3	4	...	51	52
Máquinas							
Manejadora		E – 17 2h 40 min	E – 23 1h 50 min		...		
Evaporadora	E – 25 1h 30 min			E – 10 2h 50 min	...		E – 26 0h 50 min
Condensadora	E – 15 2h 30 min		E – 18 3h 10 min		...		E – 31 0h 30 min
CTM final Electricidad	4h 00min 4,00h	2h 40min 2,67h	5h 00min 5,00h	2h 50min 2,83h	...	0h 00min 0,00h	1h 20min 1,33h

El Balanceo de tareas Mecánicas se muestra en las tablas 67 y 68. Al Igual que en el caso anterior se propone al lector su comprensión y análisis respectivo, y determinar si es posible ejecutar las tareas con el mecánico de la empresa o si es necesario subcontratar personal adicional y por cuánto tiempo.

Tabla 67. Proceso de balanceo de las Tareas de Mecánica

Semanas	1	2	3	4	...	51	52
CTM inicial M	7h 50min 7,83h	2h 50min 2,83h	4h 30min 4,50h	8h 50min 8,83h	...	5h 15min 5,25h	11h 30min 11,50h
Exceso respecto a media CTM Máx	0h 22min 0,36h			1h 22min 1,36h			4h 02min 4,03h
Holgura respecto a Media CTM Mín		3h 17min 3,28h	1h 37min 1,61h			0h 52min 0,86h	
<i>Media CTM M Máx = 7h 28min y 7,47h; Media CTM M Mín = 6h 07min y 6,11h</i>							

Tabla 68. CTM final para las tareas de Mecánica

Semanas	1	2	3	4	...	51	52
Máquinas							
Manejadora	M – 15 3h 40 min				...		M – 15 3h 40 min
Evaporadora			M – 11 4h 30 min			M – 18 3h 40 min	
			M – 17 2h 50 min				
Condensadora	M – 22 4h 10 min			M – 10 8h 50 min	...	M – 20 5h 15 min	M – 22 4h 10 min
CTM final Mecánica	7h 50min 7,83h	0h 00min 0,00h	7h 20min 7,33h	8h 50min 8,83h	...	8h 55min 8,92h	7h 50min 7,83h

3. Ejercicio propuesto 1

- Efectuar el Balanceo real del tablero de la *tabla 58*, sí:

Tiempo programable para mantenimiento TPPM por semana es de 6 horas continuas, de 2:00 P. M. a 8:00 P. M. los domingos.

Hay operarios especializados en cada labor (L, E, M, I).

Calcule el costo de efectuar las tareas si cada operador devenga 1,5 SMLV (ver *Capítulo 18 Presupuestos*).

CAPÍTULO CATORCE

Redes PERT/CPM aplicadas a Mantenimiento

Las redes PERT/CPM constituyen una herramienta basada en un método gráfico para planear, programar y controlar proyectos. En lo concerniente a Mantenimiento, el Método PERT se aplica con éxito para programar montajes y desmontajes de Plantas o equipos, modificaciones importantes a líneas de proceso o máquinas, *overhaul* o (reparación o parada general), en máquinas o procesos

14.1. Breve historia de los métodos de planificación, programación y control de proyectos con programas PERT y CPM

Cuando la marina de Estados Unidos comenzó el proyecto del “submarino atómico Polaris” en 1958, se dieron cuenta que no sólo debían vencer las dificultades técnicas y científicas, sino también el problema de coordinación y control de estos enormes esfuerzos. Este proyecto tenía 250 contratistas directos y más de 9000 subcontratistas, todo lo cual suponía una gran cantidad de recursos y factores humanos y, por lo tanto, era preciso encontrar una nueva técnica para desarrollar el proyecto con eficacia bajo un nivel razonable de costo y tiempo.

Los conceptos básicos del sistema PERT (*Program Evaluation and Review Technique* ó Técnica para la Evaluación y Revisión de Programas) como instrumento de planificación, comunicación, control e información se desarrolló por la casa *Booz, Allen y Hamilton*. El resultado de la aplicación de esta nueva técnica fue el ahorro de dos años en un proyecto de cinco años de duración total.

Casi al mismo tiempo que se desarrolló el PERT (en 1957) la casa E. I. *Dupont* desarrolló un sistema que podía mejorar el método de planificación y programación para los programas de construcción. Bajo la dirección de los señores J. E. Kelly y M. R. Walker, se creó la técnica C.P.M. (*Critical Path Method* o Método de la ruta crítica).

Los sistemas PERT y CPM son especialmente diseñados para apoyar a la dirección de las tareas donde la incertidumbre pudiera comprometer su eficacia, puesto que estos métodos ofrecen una planificación detallada, con las responsabilidades designadas y la programación mejor estimada y con más probabilidades de cumplimiento.

En esencia, a partir de una lista de actividades necesarias para culminar un proyecto, los métodos PERT/CPM identifican y determinan:

- La ruta crítica, es decir, el conjunto de actividades que limitan la duración de un proyecto a un tiempo mínimo, y que en caso de retrasarse alguna de

ellas retrasaría todo el proyecto.

- Las actividades con holgura, es decir las actividades que no están en la ruta crítica; esto es, pueden empezarse más tarde, y permitir que el proyecto como un todo se mantenga en programa. El PERT/CPM identifica estas actividades y la cantidad de tiempo disponible para retardos.
- Los recursos necesarios para completar las actividades. En muchos proyectos, las limitaciones en mano de obra y equipos hacen que la programación sea difícil. El PERT/CPM identifica los instantes del proyecto en que estas restricciones causarán problemas y de acuerdo con la flexibilidad permitida por los tiempos de holgura de las actividades no críticas, permite que el gerente manipule ciertas actividades para aliviar estos problemas.
- Finalmente, el PERT/CPM proporciona una herramienta para controlar y monitorear el progreso del proyecto. Cada actividad tiene su propio papel en éste y su importancia en la terminación del proyecto se manifiesta inmediatamente para el director del mismo. Las actividades de la ruta crítica, deben por consiguiente, recibir la mayor parte de la atención, debido a que la terminación del proyecto, depende fuertemente de ellas. Las actividades no críticas se manipularán y remplazarán en respuesta a la disponibilidad de recursos.

El método PERT se aplica esencialmente en proyectos unitarios, para los cuales no hay antecedentes de tiempos y costos, y probablemente no se repitan (únicos), como el caso de proyectos de investigación. La programación en el PERT debe estimar las duraciones de las tareas tanto en el sentido determinístico como probabilístico.

El método CPM se aplica generalmente en obras de construcción, para las cuales hay experiencias pasadas y la incertidumbre de tiempos es mínima, pero sí existe la incertidumbre de costos. En estos proyectos es importante determinar combinaciones costo/duración, que arrojen un costo total mínimo del proyecto. La programación en el CPM debe estimar las duraciones de las tareas con el mínimo de recursos, es decir, mínimo costo total.

Programación CPM

Si se exige acelerar la marcha de alguna actividad para reducir la duración del proyecto, es evidente que ello ocasionará un aumento en el costo directo y a su vez una disminución en el costo indirecto.

Costo directo

El costo directo de una actividad es la suma de los gastos de mano de obra directa, de materiales y de equipos necesarios para efectuarla. Cuando se encarga la realización de una actividad completa a una entidad distinta, por ejemplo, a una empresa consultora o a un subcontratista de construcción, el costo directo es la cantidad que habrá de pagarse a esa empresa.

La relación entre el costo directo y la duración de la actividad puede tomar diversas formas. Frecuentemente se supone que todas las actividades se pueden representar por una recta, aunque esta relación lineal a la que corresponde un alto porcentaje de actividades, de ningún modo puede aplicarse a todas ellas. Las relaciones de tiempo y costo hacen que las actividades no tengan una relación tan lineal.

Para una actividad no existe una sola duración, sino que se puede elegir entre una serie de posibles duraciones; claro está que, si se desea una duración menor, el costo directo para la terminación de la actividad aumenta.

Es inconcebible que la disminución de la duración pueda llegar a cero, aun cuando se utilicen todos los recursos de que se disponga. Por lo tanto, se presenta una duración tope que se denomina duración límite o crítica de la actividad y al costo máximo asociado se le llama costo tope, límite o crítico. El costo tope es el costo directo más elevado de la actividad. Por otra parte, el costo más bajo de la actividad está relacionado con el punto de duración normal.

Los costos indirectos

Son los gastos de dirección y supervisión y otros gastos de carácter permanente. Los intereses de capital invertido en la ejecución del proyecto, las indemnizaciones por daños, las primas y bonificaciones forman también parte de los costos indirectos o penalidades del diagrama del costo indirecto.

Programación PERT

Dado que se aplica a proyectos únicos, el PERT introduce un elemento de incertidumbre (probabilístico) al considerar cada actividad caracterizada por tres tiempos. En cada actividad PERT se detallan estimaciones para el tiempo optimista, el probable y el pesimista.

Tiempo optimista: es el tiempo mínimo que se requiere para la terminación de la actividad, si todos los factores marchan con buena suerte.

Tiempo probable: es el tiempo que con más frecuencia requiere la actividad

para realizarse; su valor se estima generalmente de la experiencia obtenida de la realización de la misma actividad bajo circunstancias similares.

Tiempo pesimista: es el tiempo máximo que se requiere para realizar la actividad teniendo en cuenta que los factores de trabajo marchen con mala suerte. El responsable directo de la realización de la actividad es el que debe suministrar la estimación de estos tres tiempos. Cualquier otra información se tomará como base de comparación.

14.2. Definiciones generales

Actividad. Puede comprender una sola tarea o bien una serie de ellas. Todo depende de la designación del responsable de los trabajos que se realizan bajo sus órdenes según la conveniencia de la realización del proyecto. Por tanto, habrá tantas actividades como responsables.

Las actividades representan trabajo en proceso, por tanto, requieren de tiempo y recursos. Se simbolizan por una flecha, por una letra que la identifique y por un número que indica la duración de la actividad. Las actividades siempre arrancan de un nodo y terminan en un nodo.

Evento o Nodo. Indica un momento determinado del proyecto, que sirve como punto de control. No implica tiempo ni recursos. Se representan por un círculo ó un rectángulo, con un número en su parte interior superior, para designarlos.

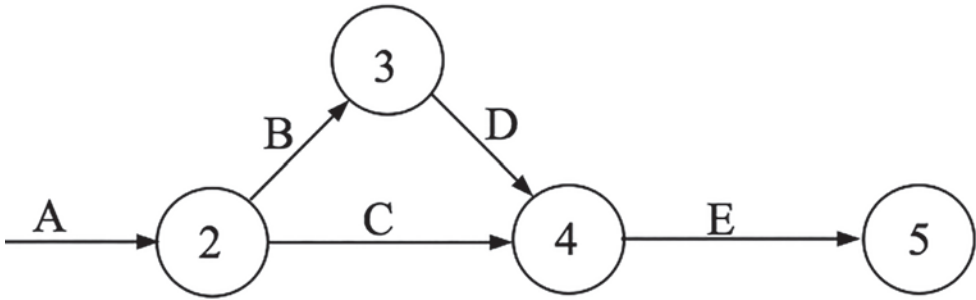
Proyecto. Es un conjunto de tareas, operaciones o actividades elementales bien diferenciables que se ejecutan según un orden determinado.

Actividad precedente. Es una actividad que se debe terminar antes de comenzar otra subsiguiente. No se puede comenzar una actividad si tiene una actividad precedente sin terminar.

Ejemplo básico de representación gráfica (Figura 182). En una construcción de maquinaria necesitamos las siguientes operaciones:

- A. Acopio principal
- B. Fabricación de maquinaria
- C. Construcción del equipo de embalaje
- D. Verificación del control
- E. Envíos e instalación

Figura 181. Ejemplo de red PERTC/CPM básica



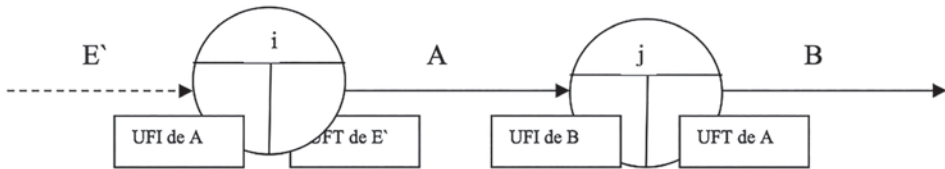
De esta manera, se podrán llamar las actividades así:

$$A = (1.2); \quad B = (2.3) \quad C = (2.4) \quad D = (3.4) \quad E = (4.5)$$

Tiempos característicos de cada actividad (Figura 183)

Cada evento o nodo (simbolizado en la red con los círculos) tiene asociados dos tiempos característicos.

Figura 182. Tiempos característicos de cada actividad



Primera fecha de realización del evento (PFI). Se indica en la división inferior izquierda del nodo. Indica la fecha más temprana en que se puede iniciar la ejecución de la actividad subsiguiente.

Última fecha de realización del evento (UFT). Se indica en la división inferior derecha del nodo. Indica la fecha más tardía en que puede terminar la actividad.

Primera fecha de terminación de la actividad (PFT). Fecha más temprana en que terminará una actividad. PFT se calcula por fórmula, no se extrae de la malla.

Última fecha de iniciación de la actividad (UFI). Es la fecha más tardía en que puede iniciar una actividad.

Holgura total (total float HT). Es la cantidad de tiempo que se puede retrasar una actividad sin afectar la duración del proyecto.

Holgura libre (free float HL). Es la cantidad de tiempo que se puede retrasar una actividad sin perjudicar la primera fecha de iniciación de actividades posteriores.

Holgura independiente (independent float HI). Es la cantidad de tiempo que se puede retrasar una actividad sin afectar la primera fecha de iniciación de las actividades posteriores y la última de las que le anteceden.

PFIAP. Primera fecha de iniciación de la actividad posterior a la actividad i-j. Menor tiempo de terminación que termina en j. Menor entre 5 y 7.

UFTAA. Última fecha de terminación de la actividad anterior a la actividad i-j.

(UFT evento i).

Nomenclatura y fórmulas:

Evento inicial: i; Evento final: j; Duración actividad: T_{i-j}

$$T_j = PFI = \max \sum T_{i-j} = \max \sum (T_i + T_{i-j}); \quad j=2,3,\dots,n \quad (30)$$

$$PFT = PFI + T_{i-j} \quad (31)$$

$$T_i = UFT = \min \sum (T_j - T_{i-j}); \quad i=1,2,\dots (n-1) \quad (32)$$

$$UFI = UFT - T_{i-j} \quad (33)$$

$$HT = UFT - PFT = UFI - PFI \quad (34)$$

$$HL = PFIAP - T_{i-j} - PFI = PFIAP - PFT \quad (35)$$

$$HI = PFIAP - T_{i-j} - UFTAA \quad (36)$$

14.3. Procedimiento para realizar una programación PERT/CPM

- Definir proyecto y objetivo.
- Hacer una lista de las actividades necesarias para ejecutar el proyecto, sin importar el orden. La lista debe incluir los responsables de realizar cada actividad.
- Elaborar la tabla secuencial T.S. (ver tabla 69). La T.S. debe contener: actividades, descripción, actividad precedente, lista de restricciones y duración de la actividad.

La T. S. debe elaborarse teniendo en cuenta las restricciones (secuencias de tipo ético, seguridad, de recursos). Esta tabla ayuda a aclarar:

Cuáles actividades pueden preceder a otras.

Cuáles actividades pueden ser concurrentes.

Cuáles actividades se realizan paralelamente.

En el ejemplo anterior, las relaciones de precedencia inmediata son:

$A < B, C$; $B < D$; $C < E$; $D < E$

- Dibujar la red (siguiendo las reglas).
- Realizar cálculos de tiempos. Aquí es necesario que la persona que haga esta operación conozca el proceso y los recursos disponibles. El cálculo de tiempos debe entregar la información correspondiente a:

Ruta crítica

Holgura total

Holgura libre

Holgura independiente

El cálculo de tiempos se apoya en una tabla de tiempos, la cual debe diligenciarse en este orden: i-j, identificación actividad, duración, PFI, PFT, UFT, UFI, HT, PFIAP, UFTAA, HL y HI.

- Complementar el dibujo de la red e identificar la ruta crítica.

Una vez realizado el cálculo de tiempos, se puede extraer la ruta crítica, la cual se puede mirar como la trayectoria de mayor duración de la red CPM, o la trayectoria formada por eventos críticos (*eventos cuya HT es cero*). La ruta crítica está formada por actividades que no pueden retrasarse, porque retrasarían todo el proyecto.

Ejemplo.

A partir de la información suministrada en la Tabla secuencial 67 adjunta, dibujar la red PERT/CPM, diligenciar la tabla de cálculos y determinar la ruta crítica del proceso.

Tabla 69. Tabla secuencial para Proyecto “Diseño de un producto nuevo”

Actividad	Descripción	Requisito	Lista de restricciones	Duración
A	Diseño	-----	-----	4
B	Ordenar pieza A	Diseño	B > A	2
C	Dibujar	Diseño	C > A	3
D	Entregar pieza A	Ordenar pieza	D > B	2
E	Preparar manuales	Dibujar	E > C	4
F	Manufacturar pieza B	Dibujar	F > C	2
G	Ensamblar	Entregar pieza A, manufacturar pieza B	G > D, F	3
H	Probar producto	Ensamblar	H > G	1
I	Transportar	Probar pieza, preparar materiales	I > E, H	1

Para finalmente determinar la ruta crítica, se debe diligenciar una tabla de cómputo de tiempos como la tabla 70. El proceso anterior es dispendioso para proyectos relativamente grandes. Dado que estamos en la era de las Tecnologías de la Informática y las comunicaciones TIC's y de que existen innumerables aplicativos para las tareas más diversas y disímiles, se muestran a continuación algunos pantallazos de la herramienta *Microsoft Project Standard* [63], el cual es en esencia un programa de administración de proyectos utilizada por personal, tanto del sector público como privado.

Tabla 70. Estructura tabla de Cómputo de tiempos

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Actividad		Duración Ti-j	PF		UF		Holgura			PFIA	UFTAA
i	j		I	T	I	T	T	L	I		
0											

La Figura 183 muestra el pantallazo de inicio del *Microsoft Project*; la Figura 184 muestra la información del ejemplo planteado, debidamente diligenciada y el diagrama Gantt arrojado, la Figura 185 muestra la ruta crítica del proyecto, y por último la Figura 186 presenta el reporte gerencial de la ruta crítica del proyecto

en cuestión. Cabe resaltar que el aplicativo tiene muchísimas más posibilidades y recursos.

Figura 183. Captura de pantalla de inicio de Microsoft Project Tomado de [105]

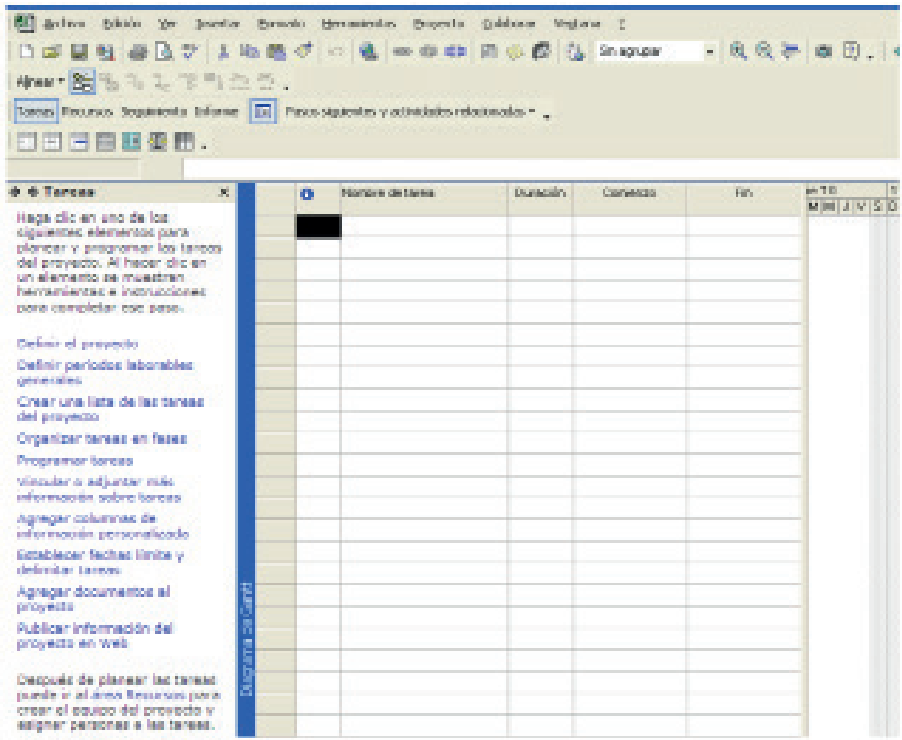


Figura 184. Información del ejemplo XX y diagrama Gantt respectivo Tomado de [105]

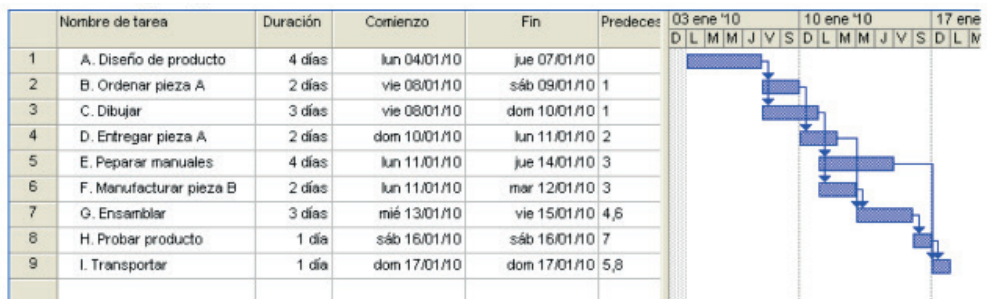


Figura 185. Ruta crítica del ejemplo. Tomado de [105]



Figura 186. Reporte gerencial de la ruta crítica del ejemplo. Tomado de [105]

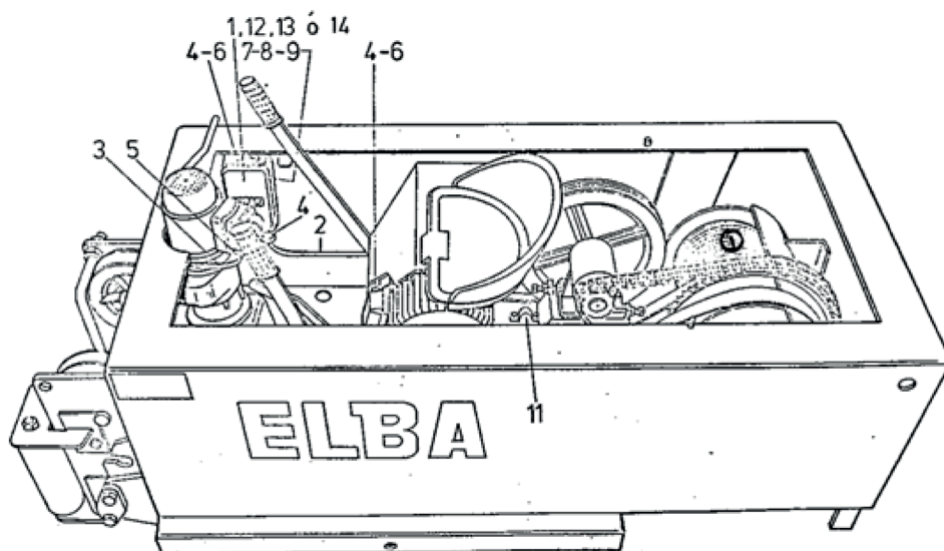
Tareas críticas el jue 21/01/10						
Ejemplo CPM						
Id	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras	
1	A. Diseño de producto	4 días	lun 04/01/10	jue 07/01/10		
Identificador	Nombre de la sucesora	Tipo	Posposición			
2	B. Ordenar pieza A	FC	0 días			
3	C. Dibujar	3 días	vie 08/01/10	dom 10/01/10	1	
Identificador	Nombre de la sucesora	Tipo	Posposición			
5	E. Preparar materiales	FC	0 días			
6	F. Manufacturar pieza B	FC	0 días			
6	F. Manufacturar pieza B	2 días	lun 11/01/10	mar 12/01/10	3	
Identificador	Nombre de la sucesora	Tipo	Posposición			
7	G. Ensamblar	3 días	mié 13/01/10	vie 15/01/10	4,6	
Identificador	Nombre de la sucesora	Tipo	Posposición			
8	H. Probar producto	1 día	sáb 16/01/10	sáb 16/01/10	7	
Identificador	Nombre de la sucesora	Tipo	Posposición			
9	I. Transportar	1 día	dom 17/01/10	dom 17/01/10	5,8	
Identificador	Nombre de la sucesora	Tipo	Posposición			

14.4. Taller 1 propuesto

Se propone manualmente y en el aplicativo *Microsoft Project* [105], dibujar la red PERT/CPM referente al proyecto descrito en la tabla secuencial 69, computar los tiempos y determinar la ruta crítica respectiva. Comparar los resultados.

14.5. Taller 2 propuesto

Existe una cierta Planta de extracción de material de río (arena y grava), y el proceso lo hacen semi-industrialmente. Uno de los equipos de dicha Planta es una Dragalina, (Figura 187) la cual posee un balde (de lámina HR 3/16”), el cual mediante un sistema de cables de acero (uno para tirar y el otro para arrastrar) es botado al fondo del río, y posteriormente es arrastrado hacia la orilla, llevando en su interior arena.

Figura 187. Vista general de la dragalina Tomado de [106]

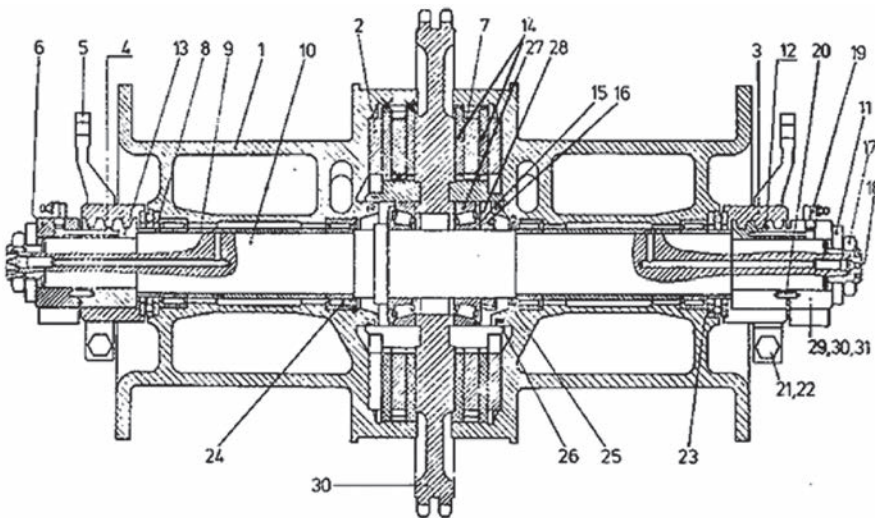
La Dragalina posee un accionamiento para tirar y arrastrar el balde, llamado Winche o Malacate, del cual se aprecia su parte mecánica en el plano de montaje adjunto (Figura 188). En la tabla 71 se informa de las partes de recambio de y desgaste (señaladas con *) del malacate.

Debido a una pobre gestión de Mantenimiento, el Malacate viene presentado varadas repetitivas y según inspecciones y consultas hechas con personal interno/ externo, las zonas del Eje principal 10, donde se instalan los rodamientos 23, 24 y 27/28 perdieron sus tolerancias; los discos de baquelita 14 están “cristalizados”, es decir, el material se degeneró y su coeficiente de fricción pasó a ser muy bajo, impidiendo la transmisión por fricción; los surcos de los tambores para cable 1 son prácticamente inexistentes, por lo cual los cables de acero que trabajan allí no se arrollan adecuadamente, elevando la fricción y reduciendo la vida útil. Por lo anterior, es necesario hacer un *overhaul* o reparación general al Malacate, consistente en una serie de actividades condensadas en la siguiente tabla secuencial 72.

Tabla 71. Relación de partes de desgaste y recambio del malacate
Tomado de [106]

N° plano	Descripción	Cantidad
1	Tambor para cable *	2
10	Eje principal	1
14	Discos baquelita *	4
23	Rodamiento 51114	2
24	Rodamiento NU 4911	4
27/28	Rodamiento 30212 y pista	2

Figura 188. Plano de conjunto del malacate a reparar
Tomado de [106]



El trabajo se realizará en estas condiciones:

- La Dirección de la Planta sólo permitirá parar la producción el sábado a las 6:00 P.M, y la Dragalina debe estar operativa el lunes a las 6:00 AM.
- Los repuestos ya están disponibles en Planta.
- Con el taller externo se programó trabajar jornada continua, incluidas las noches (en caso de ser si es necesario). Inicialmente tienen el Torno A disponible (con su operario), pero dicen que si es necesario pueden colocar

al servicio un Torno B (con su operario), pero ello aumentaría el costo de la reparación.

- Los mecánicos y supervisor de la Planta están programados y coordinados para trabajar en jornada continua.

Tabla 72. Tabla secuencial para *overhaul* de malacate

Actividad	Descripción	Requisito	Restricción	Duración (h)
A	Desmontar malacate	-----	-----	2h
B	Llevar malacate a taller	A	$B < A$	1h
C	Desarmar malacate en el taller	B	$C < B$	2h
D	“Metalizar” cada asiento del eje (donde se instala cada rodamiento). Torno A	C	$D < C$	1,75h/cada zona
E	Reconstruir surco tambor. Torno A o B. Un tambor al tiempo.	B	$E < D$ si se usa el Torno A. $E < C$ si se usa Torno B	6,5h/tambor
F	Armar Malacate en taller, usando repuestos nuevos	D completada E completada	$F < D, E$	4h
G	Trasladar malacate del taller a la Planta	F	$G < F$	1h
H	Montar malacate en la Dragalina	G	$H < G$	2h
I	Calibración del equipo, prueba de operación, ajustes finales.	H	$I < H$	3h

Desarrollar:

- Dibujar la red PERT/CPM para cada alternativa.
- Realizar los cálculos de tiempo y condensarlos en la tabla de cómputo de tiempos.
- Determinar: PFT, UFT, HT, HL, ruta crítica.
- ¿Será posible realizar el *overhaul* en el período comprendido, entre el sábado a las 6:00 P.M. y el lunes a las 6:00 A.M.? ¿Será necesario usar el Torno B?
- Si se usa solamente el Torno A, ¿a qué hora se estaría terminando el *overhaul*? ¿a qué hora si se usan los Tornos A y B?

CAPÍTULO QUINCE

Planeación de la capacidad del departamento de mantenimiento

En este capítulo se presentará una mirada del *backlog* o trabajo represado, insumo necesario de tener en cuenta en la planeación de la capacidad del departamento de mantenimiento. Posteriormente se presentarán algunas técnicas para estimar la cantidad necesaria de personal por parte del departamento de mantenimiento. La mirada del presente capítulo se centra fundamentalmente en estimar personal. La planeación de instalaciones, herramientas, equipos de apoyo, infraestructura corresponde a un proceso de diseño muy amplio, que es necesario estudiarlo por tipos y tamaños de industrias, razón por la cual no se abordará aquí.

15.1. Trabajo represado o backlog

Un dolor de cabeza permanente del personal a cargo de mantenimiento (jefes, planeadores, supervisores, ejecutantes) se resume en la expresión “Cuándo terminaré...”, con la que implícitamente se está pensando en un estado ideal en que el único trabajo pendiente conste de las OT futuras, sin embargo en la realidad ese estado ideal conllevaría al desperdicio de recursos (humanos, materiales, insumos, lucro cesante, etc.), es decir un estado real normal implica la existencia de cierta cantidad de trabajo represado o *Backlog*.

Durante el transcurrir *cotidiano* de un departamento de Mantenimiento hay dos labores principales:

- La administrativa. En esta labor se planea, se programa (tareas, recursos, herramientas, equipos, personal, etc.), se realimentan OT, se conforman y analizan indicadores, se cotiza, se indagan soluciones, etc.
- La operativa. En esta labor el personal operativo prepara los recursos físicos (equipos de repuesto, piezas fabricadas, partes, herramental, etc.) para la ejecución de las próximas OT, toma medidas, hace ajustes menores, etc.

Por diversas circunstancias las OT programadas no siempre se ejecutan en el momento programado, hay retrasos por picos de producción, por la no llegada de repuestos e insumos, por el surgimiento de OTnS, etc.; por las anteriores razones se va generando una carga de trabajo represado o *Backlog*. En otras palabras, la existencia de *Backlog* es adecuada y sana, siempre y cuando se mantenga dentro de unos rangos aceptables. El *Backlog* se mide en semanas.

El *Backlog* se puede clasificar de diferentes maneras, una de las cuales es *Backlog*

ejecutable y *Backlog* no ejecutable.

El **Backlog no ejecutable** se compone de:

- *Backlog* de necesidades de mantenimiento que aún no generaron avisos (*fallas ocultas, Analogía del riachuelo*). Figura 189.
- *Backlog* de avisos aún no priorizados
- *Backlog* de órdenes de trabajo no planeadas ***
- *Backlog* de órdenes planificadas y que no tienen todos los recursos disponibles (ejecutante, repuestos, equipos de apoyo, máquina, etc.).

En la *Analogía del riachuelo*, una persona puede mirar la película de agua de un riachuelo tranquilo y pretender que no hay piedras en el fondo. Posteriormente y palpando o desecando el riachuelo, se podrán detectar las piedras. En el caso de la administración del mantenimiento, la analogía consiste en semejar la realidad común y corriente a la película de agua del riachuelo, y los problemas a las piedras. Para un administrador desprevenido la realidad estará tranquila (sin piedras), pero al analizar con detenimiento los procesos/máquinas/equipos encontrará muchos problemas ocultos (piedras no visibles).

El **Backlog ejecutable** se compone de las órdenes de mantenimiento preventivo y correctivo programado (Figura 44, numeral 3.2.11):

- *Backlog* de órdenes planificadas y con materiales
- *Backlog* de órdenes de mantenimiento preventivo en ejecución
- *Backlog* de órdenes terminadas por el ejecutante y en proceso de control

Figura 189. Analogía del riachuelo. (a) Fallas evidentes y ocultas. (b) Fallas ocultas que se han hecho evidentes.



Es conveniente recordar que una vez que las OT de trabajo se han ejecutado el *planeador de Mantenimiento* debe proceder a su cierre (con base a la información suministrada por el ejecutante) y debe llevar también el seguimiento y control de las OT que no se ejecutaron, ya que ellas se constituyen en Backlog.

El *Backlog* se puede analizar con base a 4 características que son *estatus, prioridad, clasificación y edad*. Las tablas 73 y 74 presentan las condiciones de *Estatus y Clase*.

Tabla 73. Estatus de *Backlog*

Estatus	Situación
Backlog Alcanzable	-Esperando a ser ejecutado (programado) -En progreso -En proceso de cierre
Backlog no Alcanzable	- No aprobado. - Esperando Materiales -Esperando Planificación
Ordenes de Trabajo Terminadas	-Completado -Cancelado -Cerrado
Ordenes de Trabajo no Terminadas	-Esperando ser Aprobado -Esperando Revisión

Tabla 74. Clase en el *Backlog* con base a la antigüedad

Clase	Antigüedad (días)
Zona A	Menor que 30
Zona B	30-60
Zona C	60-90
Zona D	Mayor que 90

La *Prioridad* indica la premura con la cual se debe ejecutar una OT. La tabla 75 presenta una recomendación general de prioridades y los tiempos de ejecución que conlleva cada una de ellas.

Tabla 75. Tiempos de permanencia o espera de las OT en función de la prioridad o del tipo de trabajo

Tipo de clasificación	Prioridad	Tiempo normal de atención
Trabajo directo		
Mantenimiento de Emergencia	0	Menos de 7 días
Mantenimiento Preventivo	1	De 7 a 15 días
Mtto Correctivo programado	1	De 7 a 15 días
Mantenimiento de Rutina	2	De 15 a 30 días
Proyección total (modificaciones, <i>overhaul</i>)	2	De 15 a 30 días
Trabajo indirecto		
Tareas Administrativas	3	De 30 a 90 días
Reuniones	3	De 30 a 90 días
Capacitaciones	3	De 30 a 90 días
Resumen de Inspecciones	3	De 30 a 90 días

La eficacia en la gestión del mantenimiento se centra en una buena gestión del *Backlog*. Si no hay seguimiento en la acumulación de trabajos se puede llegar a circunstancias extremas de no tener qué hacer (estructura de departamento de Mantenimiento muy robusta y costosa) o de no tener con qué suplir la CTM (personal sobrecargado y *apagando incendios*). Un *Backlog* no evaluado o poco valorado puede ocultar problemas potenciales tanto en recursos, eficiencia y disponibilidad. Una forma de cuantificar las semanas de *Backlog* es aplicando la fórmula 37:

$$BK = \frac{HTE}{HRT} \quad (37)$$

Donde

BK es el trabajo represado o *Backlog* (en semanas);

HTE son las horas de trabajo de mantenimiento en espera;

HRT son las horas reales de trabajo en mantenimiento, de la semana anterior.

Con la aplicación de esta sencilla fórmula se puede conocer la acumulación de carga de trabajo la cual debe estar en un promedio de 3 semanas, es decir, idealmente el *Backlog* debería ser Clase A (Tabla 74) y adicionalmente debe relacionarse con el tipo de trabajo y la prioridad establecida en la tabla 75.

Si el *Backlog* calculado no está en línea con los dos criterios anteriormente

mencionados, es necesario acudir a estrategias que permitan mejorarlo, como por ejemplo:

- Contratar personal adicional para ajustar las tareas pendientes.
- Laborar horas extras con el personal existente.
- Redefinir la capacidad del departamento de mantenimiento, es decir, estimar y definir la cantidad (y formación en caso de ser necesario) de técnicos u operarios, supervisores, jefes necesarios para reducir el exceso de *Backlog* a un promedio aceptable.

Ejemplo *Backlog*

Un departamento de mantenimiento laboró 120 horas una cierta semana; de esas 120 horas, 55 correspondieron a tareas de correctivo de emergencia, 25 a Correctivo Programado y 40 a Preventivo. El Programador de Mantenimiento alimentó la información en su CMMS y encontró que hay 130 horas de Correctivo Programado en espera y 90 horas de Preventivo en espera.

Evalúe el *Backlog*. Defina si está dentro de lo órdenes permisibles y en caso contrario elabore propuestas que solucionen la crisis.

Solución:

En primera instancia se hará una evaluación global, es decir, mezclando los tiempos de Preventivo y Correctivo.

$$BK_{global} = \frac{90 + 130}{120} = 1,8 \text{ semanas}$$

Con base a este resultado si se compara con la tabla 74 sería Clase A, es decir estaría bien, y si se evalúa en función de prioridades en la tabla 75, el Correctivo Programado y el Preventivo poseen prioridad 1 que corresponden a un retraso permisible de 7 a 15 días, y el cálculo arrojó 1,83 semanas, por lo tanto aparentemente ***todo está bien.***

En segunda instancia se hará una evaluación por separado:

$$BK_{preventivo} = \frac{90}{40} = 2,3 \text{ semanas}$$

Con base en el resultado del preventivo, si se compara con la tabla 74, sería Clase A, es decir estaría bien, y si se evalúa en función de prioridades en la tabla 75, las 2,3 semanas superan la prioridad 1 del Preventivo, por lo tanto, la situación yano *estan tranquilizadora*.

$$BK_{correctivo} = \frac{130}{80} = 1,6 \text{ semanas}$$

Con base en el resultado del correctivo, si se compara con la tabla 74 sería Clase A, es decir estaría bien, y si se evalúa en función de prioridades en la tabla 75, las 1,6 semanas no superan la prioridad 1 del Correctivo, pero razonando son sensatez la situación es bastante preocupante porque la semana anterior el 67% de labor se dedicó al Correctivo (en gran parte de Emergencia), y de lo que está pendiente el 59% corresponde a correctivo Programado, que fácilmente se puede convertir en Emergencia.

Una posible solución podría ser contratar un proveedor externo que ejecute las tareas de correctivo Programado, con lo cual la cuadrilla de trabajo de la empresa se podrá dedicar a atender el Preventivo y reducir el atraso que hay.

15.2. Planeación capacidad de Mantenimiento

Basados en la Figura 2 (Capítulo 1), recuérdese que la dinámica del Mantenimiento exige unas labores de planeación, programación, ejecución, medición y comparación. La labor de programación de mantenimiento preventivo se condensa en un *Tablero de control balanceado*; para atender las CTM, el Departamento de Mantenimiento posee unos *Recursos* o *Capacidad de Mantenimiento*, representada en hombres (internos o subcontratados), equipos, herramientas, *software*. Pueden darse dos situaciones generales:

- Que la empresa esté en operación y el *Backlog* sea muy alto (Ver numeral 15.1), personal sobrecargado de trabajo y constantemente atendiendo correctivos de emergencia.
- La empresa va a entrar en operación y no se tiene una idea muy clara de cuál debe ser la capacidad del departamento de mantenimiento.

Tanto en el caso de si la empresa está en operación o si entrará en funcionamiento luego, los cuadros directivos, y particularmente el departamento de mantenimiento debe estar en capacidad de auto-evaluarse y determinar si su *Capacidad* (recursos) es la adecuada a las necesidades actuales o futuras de la empresa.

La labor de definir el número de personas que debe emplear un departamento

de mantenimiento es un proceso relativamente complejo, que depende de factores propios de la organización y de factores asociados a las máquinas/equipos. Entre los *factores organizacionales* se tienen: tipo de industria (Tabla 74), tamaño de la industria, el *layout* de planta, la existencia de sucursales, políticas de subcontratación, el ambiente físico y laboral, las políticas de Mantenimiento, el nivel de destreza y de especialización de los operarios y administrativos, la disponibilidad de repuestos, los procedimientos de ubicación de fallas y de control de trabajo, la calidad de la documentación, los recursos disponibles para la ejecución de las actividades (espacio de trabajo, talleres, máquinas, equipos de prueba, equipos de levantamiento y manejo de materiales equipos especializados, etc.), entre otros.

Entre los *factores asociados a las máquinas/equipos* están el diseño inicial del sistema o de los subsistemas que lo conforman, la edad de las máquinas/equipos, el número y variedad de las máquinas/equipos. El *diseño inicial* de las máquinas/equipos determina en gran medida los procedimientos de Mantenimiento y la duración de los tiempos de reparación, ello va en relación con la modularidad, la accesibilidad, la estandarización e intercambiabilidad de los componentes usados. Intrínsecamente el diseño inicial está afectado por la tecnología de fabricación y el costo inicial del equipo (ver *numeral 1.7*).

Una forma de hacer el auto-análisis mencionado líneas arriba, podría ser por comparación con referentes generales por subsector económico, tal como lo muestra la tabla 76. En dicha tabla se presenta un panorama comparativo general de los Costos Directos de Mantenimiento CDM versus los costos operativos totales de la empresa.

Otra forma de valorar el tamaño del departamento de mantenimiento es con base a unos históricos *generales* (ver *Capítulo 18*). En ciertas industrias, del 100% del presupuesto de Mantenimiento directo, el 70% es absorbido por mano de obra y el 30% restante lo absorben materiales. Otras industrias (minería, por ejemplo) el referente previo puede invertirse, dado que se hace uso intensivo de partes de desgaste costosas. En maquinarias antiguas la relación puede ser 50% materiales - 50% mano de obra [107]. En maquinarias más modernas la relación puede ser 65% materiales - 35% mano de obra [107]. La combinación del factor anterior y de la tabla 74, pueden dar una idea de la cantidad de hombres requeridos en algunas industrias.

Tabla 76. % CDM versus Costo operativo total, según el subsector económico.

Subsector	% Costo Directo de Mantenimiento CDM vs Costo operativo total
Minería	20 – 50
Siderurgia	15 – 25
Instalaciones eléctricas	15 – 25
Manufactura	5 – 15
Procesamiento	3 – 15
Ensamblaje	3 – 5

Ejemplos:

- Empresa alimenticia *Meals de Colombia* en Manizales. 650 personas en planta, de las cuales 17 son ejecutantes de mantenimiento [55].

- Empresa confecciones *D'Moda* en Pereira. Aproximadamente 100 personas en planta, de las cuales uno es polivalente para mantenimiento.

15.3. Pronósticos para estimación numérica de la capacidad del departamento de mantenimiento

A un nivel más profundo y analítico, la estimación la Carga de trabajo de mantenimiento se puede hacer aplicando los siguientes métodos (consultar la referencia [99]):

- Promedio móvil simple
- Promedio móvil ponderado
- Análisis de Regresión

Promedio móvil simple

El promedio móvil simple es una herramienta que permite hacer un pronóstico sencillo de la carga de mantenimiento. A partir de datos históricos de CTM de periodos anteriores, se calcula un promedio o media aritmética, la cual se constituye en la carga de mantenimiento pronosticada para el enésimo período. En hoja electrónica Excel basta con aplicar la función *promedio* a los datos conocidos.

Promedio móvil ponderado

En el promedio móvil simple se le da la misma importancia o “peso” a todos los datos históricos, mientras que en el promedio móvil ponderado se le asignan diferentes “pesos” o importancia a las diferentes observaciones. La variación de los pesos los define el personal de mantenimiento, en función de la confiabilidad de los datos; por ejemplo, en un cierto mes y debido a un pico de producción se dejó de hacer mantenimiento y se represó para el siguiente mes, siendo poco confiables las informaciones de ambos meses (el primero por defecto y el segundo por exceso).

Para establecer un pronóstico de CTM para el período (n+1) se ha de hacer uso de la fórmula 39, pero primero se deben definir los “pesos” de los períodos en consideración, para lo cual se debe cumplir lo indicado por la fórmula 38.

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (38)$$

Donde

W_i es el peso del i-ésimo período.

$$CTM_{n+1} = \sum_{i=1}^n W_i CTM_i \quad (39)$$

Donde

CTM_{n+1} es la carga de trabajo para el período en estudio;

CTM_i es la carga de trabajo de mantenimiento para el i-ésimo período.

Análisis de Regresión

Esencialmente, pretende hallar un modelo matemático de la CTM por regresión lineal, con fin de hacer predicciones para períodos posteriores.

15.4. Estimación de la Capacidad del departamento de mantenimiento, utilizando un método aritmético

En primer término, se debe efectuar una estimación *básica* de la carga de trabajo de mantenimiento CTM global, vía estudio de los manuales y catálogos de las máquinas nuevas, con aportes de los mantenedores, consultas al fabricante y/o distribuidor, y consultas en literatura especializada. La fórmula 40 permite calcular la CTM.

$$CTM = HHS + HHC + HHT + HHSa \quad (40)$$

Donde

HHS son las horas-hombre de mantenimiento sistemático (Fuente: manuales y fichas técnicas de los equipos). Tareas como inspecciones, lubricaciones, ajustes, calibraciones;

HHC son las horas-hombre de Correctivo (Fuente: estimaciones, históricos): reparaciones diversas, trabajo destinado a eliminar tareas repetitivas y monótonas;

HHT son las horas-hombre taller y alistamientos: preparación de unidades de repuesto o equipos de respaldo, reparación de herramientas y equipos de mantenimiento.

HHSa son las horas hombre aseo y salubridad de restaurantes, vestidores, etc.

Una vez conocida la CTM, se puede efectuar una estimación *básica* de la CTM corregida, de acuerdo con lo indicado por la fórmula 41.

$$CTM_{corr} = CTM \times FTM \times FAu \times FA \times FV \quad (41)$$

Donde:

FTM es el factor de tiempo muerto (lapsos entre culminar una tarea y proceder con la siguiente);

FA: es el factor de ausentismo;

FX es el factor de accidentalidad;

FV es el factor de vacaciones.

Una vez conocida la CTM_{corr} , y haciendo uso de la fórmula 42, se podrá hacer una estimación más realista de la cantidad y especialidad de los ejecutantes de mantenimiento requeridos.

$$No\ ejec = \frac{CTM_{corr}}{HJ} \quad (42)$$

Donde

No ejec. es el número de ejecutantes requeridos;

HJ son las horas de trabajo por jornada.

15.5. Preguntas de consulta o análisis y ejercicios

- Cuando se balancea un Tablero de control se recomienda no atrasar o adelantar tareas por un período de más de una semana. ¿Qué relación encuentra entre esa recomendación y la *clase* del Backlog?
- ¿Cómo se interpretaría un Backlog cuyo valor fuese Cero?
- ¿Cómo se interpretaría un Backlog cuyo valor tendiese a infinito?
- Entre los dos valores de Backlog anteriores ¿Cuál sería mejor y por qué?

Ejercicio propuesto 1

Un departamento de mantenimiento laboró 40 horas una cierta semana; de esas 40 horas, 25 corresponden a tareas de correctivo de emergencia, 5 a Correctivo Programado y 10 a Preventivo. El Programador de Mantenimiento alimentó la información en su software y encontró que hay 70 horas de Correctivo Programado en espera y 20 horas de Preventivo en espera.

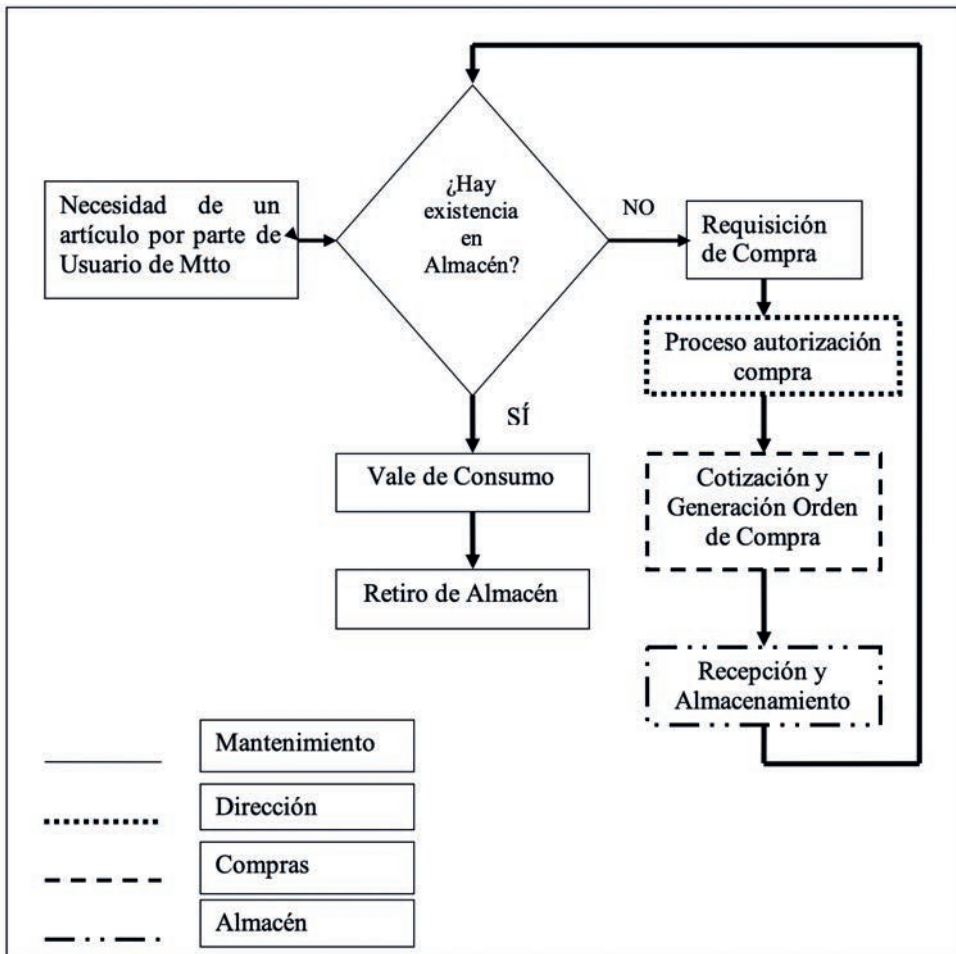
Evalúe el *Backlog*. Defina si está dentro de los órdenes permisibles y, en caso contrario, elabore propuestas que solucionen la crisis. ¿Qué opinión le merece la administración de ese departamento de Mantenimiento?

CAPÍTULO DIECISÉIS

Gestión básica de un Almacén de repuestos

Los departamentos de Compras, Almacén y Mantenimiento deben trabajar de una manera independiente, pero complementaria, es decir, debe haber sinergia (Asociación de factores de producción que actuando conjuntamente generan un producto mayor que el que se deriva de su empleo individual), tal como lo ilustra la Figura 190.

Figura 190. Diagrama de flujo Proceso de retiro producto almacén



Como función básica, el almacén es la dependencia (Recurso humano + Software)

+ instalaciones físicas) de una compañía, encargada de asegurar que los insumos, repuestos y demás artículos necesarios para el normal desenvolvimiento de esta, estén disponibles en la cantidad, calidad y momento adecuados. Un Almacén debe regular el flujo de abastecimiento, proteger los materiales mientras son retirados del almacén y facilitar su distribución.

16.1. Generalidades de la gestión de un almacén

La gestión de un almacén conlleva a reflexionar alrededor de las siguientes preguntas básicas: ¿Qué hay que pedir y almacenar? ¿Cuánto hay que pedir? ¿Cuándo hay que comprar? ¿Cómo disponer los almacenes? ¿Cuál es el costo financiero de almacenar los productos? ¿El almacén debe ser centralizado o descentralizado (sub-almacenes)? Las reflexiones básicas alrededor de las preguntas planteadas son las siguientes:

¿Qué hay que pedir y almacenar? ¿Cuánto hay que pedir? Depende del sistema de mantenimiento empleado por la organización (*Capítulo 1, Sistemas de mantenimiento*). Si esencialmente se aplica mantenimiento correctivo (cambio a la falla), entonces podría darse el caso de tener un almacén sobrecargado, “por lo que pueda pasar”, con el elevado costo de administración y financiero que ello acarrearía. Por el contrario, podría ser un almacén infravalorado, en el cual los abastecimientos lleguen de manera reactiva y tardía. Por otra parte, si se aplican adecuadamente modelos programados de mantenimiento (*Capítulo 11*), es decir, con cambios programados, habrá más racionalidad en el tipo de elementos pedidos y almacenados, dado que habrán pasado por el filtro del conocimiento del proceso, de las máquinas, apoyado en estadísticas de falla y consumo.

¿Cuánto hay que pedir? ¿Cuándo hay que comprar? Esta respuesta guarda relación con la pregunta anterior (sistema de mantenimiento empleado), pero adicionalmente hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Costo financiero del inventario.** Básicamente depende de la frecuencia de rotación del inventario, afectada por el costo de administración del almacén. La frecuencia de rotación del repuesto está asociada a las frecuencias de ejecución de las tareas de mantenimiento.
- **Costo de paros de producción.** Hace referencia al lucro cesante generado una vez ocurrida una falla funcional, y no disponer del repuesto. Se puede evaluar conociendo el costo de parada de planta/hora y comparándolo contra el costo de almacenamiento del repuesto.
- **Descuentos por compras por volumen.** Si el departamento de

mantenimiento tiene previstas las cantidades anuales a consumir, reduce el costo de adquisición y facilita la labor de compras y almacenamiento, pudiendo retirarse completamente el pedido, o haciendo retiros parciales con una orden de compra anualizada.

- **Grado de estandarización.** En la medida en que las máquinas/equipos de una empresa pertenezcan a unas pocas marcas y modelos, se reducirá la cantidad de inventario requerido.
- **Porcentaje de trabajos efectuados por contratistas** (*ver Capítulo 17*). Las políticas de la empresa y los tipos de contrato que se hayan establecido (a todo costo o solo mano de obra y recargo por suministro de contratos), influirán en la cantidad y frecuencia de los pedidos.
- **Ubicación geográfica de la empresa o la sucursal.** En la medida que la empresa quede ubicada en centros urbanos importantes, los tiempos de entrega serán mínimos, con lo cual se reducirá la cantidad de inventario.
- **Origen del repuesto y criticidad.** Otro criterio está asociado a si el repuesto es de existencia normal en el país, o si es de importación, y adicionalmente, si su ausencia afecta a una máquina/equipo considerada crítica en la organización. Naturalmente lo anterior guarda relación con patrones de falla y estadísticas de consumo.

¿Cómo disponer los almacenes? ¿El almacén debe ser centralizado o descentralizado (sub-almacenes)? Los almacenes pueden ser centralizados o descentralizados (sub-almacenes) y cada estructura tiene sus ventajas y desventajas.

Almacén centralizado o único para la empresa. Usualmente se aplica en empresas con una sola sede. Ventajas: Conocimiento del todo el personal del almacén de todos los materiales almacenados, menos espacio total ocupado, tiempos de entrega menores, menos costo de fletes, costo de almacenamiento menor. Desventajas: dependiendo del tamaño de la empresa, los recorridos al almacén pueden ser largos y retrasar las tareas de mantenimiento. Si la empresa posee sucursales, se incrementan los tiempos de entrega y los costos de fletes, y puede llegar a entorpecer las labores de mantenimiento.

Almacén descentralizado o sub-almacenes. Aplica para organizaciones muy grandes, en los cuales los recorridos de un área al almacén principal son largos. Aplica también cuando hay varias sucursales o cuando ciertas áreas requieren repuestos muy específicos. Ventajas: atención rápida al

usuario. Desventajas: implica más personal para administrar los repuestos, duplicación de existencias, más difícil el control general del almacén, costo de almacenamiento más elevado.

El gerente/jefe de mantenimiento en compañía de personal financiero deben sopesar las diferentes variables enunciadas previamente, con el fin de alcanzar equilibrios entre los aspectos técnicos, operativos y financieros.

16.2. Otras funciones de los almacenes de repuestos de mantenimiento

Desde el punto de vista de Ingeniería de Mantenimiento, el almacén y su personal no solo deben almacenar y entregar repuestos (con vale electrónico o manual), sino que con la ayuda del software adecuado, deben administrar o gestionar el almacén, lo cual se logra atendiendo 3 tareas fundamentales:

Análisis de stock	¿Qué hay que pedir? ¿Cuánto hay que pedir?
Análisis en la Rotación	¿Cuándo hay que pedir?
Control de Inventarios	¿El costo Contable se corresponde con el inventario físico?

Las 3 tareas fundamentales se corresponden con el siguiente desglose de tareas específicas:

- Clasificar y codificar los repuestos
- Verificar la calidad de los repuestos ingresados al almacén
- Apilar o acarrear los artículos y materiales, cumpliendo con todas las normas de seguridad establecidas, de la empresa y para el producto
- Registrar los movimientos periódicos y elaborar informes de consumo
- Definir niveles de bajas existencias y lanzar alarmas a tiempo
- Realizar órdenes de compra (válido para ciertas organizaciones)
- Determinación de puntos de pedido o de reorden (*ver numeral 16.8*)
- Atender entregas en situaciones excepcionales (varadas o paradas generales de planta)
- Garantizar que los elementos que sean de fabricación lleguen en los plazos

previstos

- Coadyuvar en los procesos de simplificación, estandarización y sustitución de materiales
- Garantizar la seguridad física de los elementos almacenados (lo almacenado físicamente se debe corresponder con lo indicado por el software)
- Efectuar análisis de rotación de inventario
- Propuestas de racionalización en las compras, por excesos y artículos innecesarios
- Elaborar propuestas de negociación con proveedores, que permitan reducir el costo de los inventarios
- Periódicamente o a petición de los interesados, elaborar informes de existencias y el valor de lo almacenado

16.3. Clasificación general de los Materiales de un Almacén

La clasificación y codificación de los repuestos coadyuva al control del almacén, puesto que los clasifica en familias, las cuales están asociadas a unas frecuencias de consumo, permitiendo adelantar procesos de negociación beneficiosos para la empresa y racionalizar la cantidad de existencias (costo financiero).

- **Repuestos específicos o repuestos-máquina.** Son las partes de recambio o de desgaste que pertenecen a máquinas/equipos muy especializados, o cumplen labores muy específicas en subsistemas muy especializados. Usualmente son partes que son únicos para un modelo de equipo de máquina. Ej. Árbol de levas de motor *Cummins* VTA 28 o el rodamiento-*encoder* de la Figura 191.
- **Repuestos comunes.** Son aquellos componentes de máquinas o repuestos que son aplicables a equipos diversos en diferentes industrias. Ejemplos: Motores eléctricos, reductores de velocidad, bombas, ventiladores, cilindros hidráulicos, instrumentación.

191. Rodamiento - encoder SKF 6202 VK2415. Tomado de [3]



- **Repuestos estandarizados (típicos o genéricos).** Partes y piezas de equipos, que son estructural y funcionalmente similares y útiles en diversos equipos.

Correas, cadenas, piñones para cadena, rodamientos, chumaceras, retenedores, llantas, lubricantes, grasas, cuñas, bandas, acoples, etc.

- **Materiales y accesorios de apoyo.** Son los elementos que pueden ser incorporables a la fabricación de medios de producción, o al transporte y manejo de servicios.

Pinturas, líquidos de limpieza, perfilería metálica, tubería y sus accesorios, cables y alambres, soldadura, etc.

- **Elementos de seguridad industrial, dotación, aseo.** Botas, monogafas, máscaras, caretas, uniformes, toallas, jabón, etc.

- **Herramientas.** Dispositivos usados para posibilitar las tareas de mantenimiento.

En la Tabla 77 se presenta una relación de partes o repuestos, su rotación normal y su clasificación.

16.4. Estructura básica de un código de repuesto y asignación a centros contables

Con el fin de mejorar el control del almacén, es necesario que contablemente se creen códigos contables de repuesto y material de mantenimiento. El código contable permite hacer rastreos de consumos por rubro específico. Una posible opción es la mostrada en la tabla 78.

Tabla 77. Clasificación de los repuestos por rotación. Tomado de [2]

Partes o repuestos	Rotación	Clasificación
Estopas, detergentes, telas de limpieza, filtros, lubricantes	Diario-semanal	Accesorios de apoyo
Empaques filtros, mangueras	Mensual	Repuestos estandarizados – Material de apoyo
Frenos, bujes, mangueras	Trimestral	Repuestos estandarizados
Rodamientos, correas, empaques de cilindros	Semestral	Repuestos estandarizados
Chumaceras, engranajes, cilindros	Anual	Repuestos estandarizados
Moto-reductores, componentes electrónicos	5 años	Repuestos comunes
Tuercas, tornillos, tubos, bombillas, pintura	Continuo	Accesorios y material de apoyo
Guantes, caretas, monogafas	Continuo	Dotación
Taladros, llaves de tubo, equipo de soldar, machuelos	Uso regular, pero son devolutivos	Herramientas

Tabla 78. Códigos contables de material de mantenimiento. Tomado de [2]

Código contable	Descripción
000	Combustibles
100	Material de protección y
201	Material misceláneo de mantenimiento
202	Material de aseo
203	Para líneas de producción específicas
204	Mantenimiento mecánico
205	Mantenimiento equipo de transporte
206	Repuestos importados
207	Mantenimiento eléctrico

El código de un repuesto sirve para identificar su tipo o variedad y, además, facilita su manejo en el *software* de administración del almacén. Una posible estructura de código de repuestos o materiales es la presentada a continuación:

XX XX XXX XXXX

Grupo - Subgrupo - Ordinal por índice alfabético

En la tabla 79 se presenta una posible clasificación de repuesto por grupo, subgrupo y clasificación.

Tabla 79. Tabla de codificación de repuestos

Tomado de [2]

Grupo	Subgrupo	Designación
01	00	Productos de mantenimiento mecánico
02	00	Artículos eléctricos comunes
	01	Artículos eléctricos especiales
03	00	Tubería y accesorios de acero
	01	Tubería y accesorios conduit
	02	Tubería y accesorios galvanizados
	03	Tubería y accesorios inoxidable
	04	Tubería y accesorios PVC
	05	Grifería común y sus repuestos
	06	Tubería y accesorios de aluminio - cobre
04	00	Aceros especiales
	01	Aceros maleables
	02	Metales no ferrosos
05	00	Rodamientos comunes
	01	Rodamientos especiales

Un ejemplo de código de repuesto puede ser 03-00-0003, cuyo desglose sería:

Grupo 03 : Tuberías

Subgrupo 00: Tuberías de acero al carbón

Ordinal 0003 : Tubería Acero al carbono, ϕ 3”, Sch. 40 x 6m longitud

Niveles de stock

Los niveles de stock también llamados niveles de acumulación son aquellas cifras que indican las cantidades de cada artículo, que deben guardarse para atender de manera satisfactoria la demanda. En la realidad, la gestión de un almacén entre otras

se enfrenta a limitaciones de espacio, de capital financiero y del ritmo de descarga de los materiales, por lo tanto, es necesario efectuar análisis de rotación.

Stock mínimo (S_m), es aquella cantidad de materias primas, materiales o repuestos que necesita la línea de producción o la línea de servicio para satisfacer su demanda, mientras espera la llegada de nuevas reposiciones. El S_m (fórmula 43) supone el límite inferior de existencias, del cual no se debe bajar.

$$S_m = D_m \times T_r \quad (43)$$

Donde:

S_m es el stock mínimo (en *ud*);

D_m es la demanda del producto en unidades por unidad de tiempo (ud/mes,

ud/día, ud/h);

T_r es el tiempo de reposición (meses, días, horas).

Tiempo de reposición (T_r), tiempo estimado para que el Proveedor haga entrega efectiva del repuesto o material en el Almacén. Debe contemplar el tiempo de trámite de la requisición de compra por parte del usuario, tiempo para el trámite de compra y tiempo de entrega en almacén (o fabricación) por parte del proveedor. El T_r depende también de si el elemento es de importación, o de consecución nacional o local.

Stock de seguridad (S_s): cantidad de material (por encima del S_m), que se debe mantener en almacén, previendo alguna eventualidad (paro, cierre de vías, demora en importación, etc.). El S_s (fórmula 44) Se define en función de un margen de seguridad $M.S.$ (que debe ser evaluado para cada situación particular).

$$S_s = S_m \times (1+M.S.) \quad (44)$$

Donde

S_s es el stock de seguridad;

$M.S.$ es el margen de seguridad. Se define para cada situación particular (puede oscilar entre un 10% y un 20%).

Ejemplo básico para determinación de S_m . Una flota de 16 camiones

requiere cambio de aceite y kit de filtros, cada 5000 km, los cuales por históricos los recorren en un período de un mes. Los filtros se compran en Bogotá directamente al distribuidor de los camiones en Colombia, y desde el momento que el Proveedor recibe la orden de compra transcurren 3 días para que estén en Pereira, y el trámite interno de compra en la Empresa dura 10 días. ¿Cuáles deben ser el S_m y el S_s de los kits de filtros? De acuerdo con la tabla 77 ¿En qué categoría están estos repuestos?

$$S_m = \frac{16 \text{ kit}}{\text{mes}} \times 13 \text{ días} \times \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} \approx 7 \text{ kit}$$

Asumiendo un M.S. del 20%

$$\rightarrow S_s = 7 \text{ kit} \times (1 + 0,2) = 8,4 \text{ kit} \approx 9 \text{ kit}$$

16.5. Rotación Inventarios R

Parámetro que sirve para analizar hasta qué punto es ágil la inversión de los recursos financieros en repuestos (fórmula 45).

$$R = \frac{D}{(Q/2)} \quad (45)$$

Donde

R es la rotación anual de inventario;

D es la demanda o consumo anual, en las unidades adecuadas;

$Q/2$ es el inventario promedio anual.

Ejemplo 1. El Histórico de existencias de un cierto almacén proporcionó la siguiente información acerca de un aceite Mobil Delvac Super 15W40, con un costo promedio de \$100 000 / Gal:

Año 2017.

Enero, febrero, Marzo : 400 Gal saldo promedio

Abril, mayo y Junio : 600 Gal saldo promedio

Julio a diciembre : 400 Gal saldo promedio

La demanda D en ese año fue de 2 400 Gal.

Año 2018.

Enero, febrero, Marzo	:	480 Gal saldo promedio
Abril, mayo y Junio	:	600 Gal saldo promedio
Julio a diciembre	:	700 Gal saldo promedio

La demanda D en ese año fue de 2 300 Gl.

¿Cuál fue la rotación del inventario en cada año? ¿Cuál de los dos factores de rotación fue el mejor? ¿Cuál será el valor ideal del índice de rotación? ¿En qué categoría están estos aceites?

$$R_{2017} = \frac{[440 \times 3 + 600 \times 3 + 400 \times 6]}{2400} \approx 2,3$$

$$R_{2018} = \frac{[480 \times 3 + 600 \times 3 + 400 \times 6]}{2400} \approx 3,2$$

Entre más bajo sea R será mejor, puesto que indica que lo que está llegando se está consumiendo, por lo tanto, será mejor R_{2017} con respecto a R_{2018} .

Otra forma de cuantificar y analizar la rotación de los inventarios, es efectuando un análisis por Costo, aplicando el indicador Rotación de inventario de repuestos RIR (fórmula 46).

$$R.I.R. = \frac{CR_{per}}{CI} \tag{46}$$

Donde

$R.I.R.$ es la Rotación de inventario de repuestos;

CR_{per} es el costo de repuestos consumidos en el período;

CI es el costo del inventario.

Aplicando la fórmula 46 al ejemplo 1, tendríamos los siguientes RIR:

$$R.I.R._{2017} = \frac{[2400 \text{ gal} \times \frac{\$100\,000}{\text{gal}}]}{400 \text{ gal} \times \frac{\$100\,000}{\text{gal}}} = 6,0$$

$$R.I.R._{2017} = \frac{[2400 \text{ gal} \times \frac{\$100\,000}{\text{gal}}]}{400 \text{ gal} \times \frac{\$100\,000}{\text{gal}}} = 6,0$$

En el caso del RIR, entre más grande sea su valor, indicará que el producto ha rotado más y que el inventario es bajo. En ese orden de ideas es mejor RIR_{2017} que RIR_{2017} , lo cual es consecuente con lo mostrado por la rotación de inventarios R.

Por otra parte, el análisis de Pareto aplicado a los inventarios indica que: **“El 80% del costo del inventario se concentra en el 20% de las referencias”**. Es evidente, entonces que Mantenimiento conjuntamente con el Almacén, deben realizar análisis prioritarios de Rotación de inventario R y de Rotación de inventario de repuestos RIR, sobre el 20% de las referencias que concentran el 80% del costo del Inventario, y tomar decisiones si hay lugar.

16.2 Análisis económico básico de costos de inventario

Existen 3 grandes categorías a tener en cuenta:

- Costo de almacenamiento
- Costo de pedido
- Costo de rotura de stock o por estar fuera de existencia

Costo de almacenamiento. Independiente del costo del elemento, disponer de unos repuestos en el almacén acarrea unos costos representados en:

- Costo de las instalaciones usadas para almacenamiento (renta (local alquilado); servicios públicos, vigilancia y mantenimiento del local propio)
- Costo del personal administrativo y operativo del almacén
- Costo de los equipos para izaje y movilización de los elementos
- Costo de los seguros contra robo, accidentes, desperfectos, obsolescencia

Un valor de referencia del costo de almacenamiento puede ser del 25% con respecto al costo del elemento, no obstante, debe ser evaluado para cada organización.

Costo de pedido. Es el costo asociado a formalizar un pedido y entregar el producto en el almacén. Se subdivide en:

- Costo de emisión del pedido. Costo asociado al trabajo administrativo

requerido para hacer el pedido cotizaciones, llamadas, expedición de la orden de compra, facturación, cumplido a la llegada, etc.

- Costo de recepción del producto. Inspección, traslado, organización.

Sumando el costo de almacenamiento y costo de pedido se obtiene el costo de lote.

Costo de rotura de stock o por estar fuera de existencia. Es el costo asociado al lucro cesante y perjuicios acarreados por la rotura o daño de un elemento que no se encuentra en el almacén de repuestos. Se debe comparar contra el valor de la hora de parada de planta (valor propio para cada organización) y la posible afectación al *Goodwill* de la organización.

16.6. Algunas estrategias para racionalizar inventarios

En la medida en que se dispongan de estadísticas confiables (R, RIR), Almacén con el acompañamiento de los departamentos de Mantenimiento y Compras deben efectuar análisis y plantear estrategias de manejo de los inventarios y expedición de las órdenes de compra, para racionalizar el costo del inventario, reducir la laboriosidad en la generación de requisiciones de compra monótonas (productos que mes a mes se piden de manera rutinaria) y atender adecuadamente al usuario Mantenimiento. Algunas de dichos análisis y estrategias son:

(a) Definir Stock mínimo S_m para los elementos de alta demanda

(b) Material en consignación

Acordar con el proveedor que en el almacén de la empresa mantenga un estante surtido con los elementos acordados en una orden de compra global (para un trimestre, semestre o año). En cortes mensuales (por ejemplo), se liquidará lo consumido. Se usa para productos estandarizados, materiales de apoyo, EPP, tales como tornillería, estopa, guantes, gafas de protección personal, etc.

(c) Punto de pedido o re-orden.

Con base en históricos de consumo determinar existencias máxima y mínima de algún ítem, y que el software de compras dispare automáticamente las órdenes de compra.

(d) Negociar repuestos estandarizados para todas las sucursales

Con este tipo de negociaciones, se reducirá el valor de las compras, al manejarse compras por volúmenes importantes.

(e) Disponer de repuestos críticos

En la medida que la empresa posea máquinas estandarizadas en unas pocas marcas y modelos, se podrán definir repuestos que debido a su daño, pueden detener por completo la producción.

CAPÍTULO DIECISIETE

Subcontratación en Mantenimiento

Se define subcontratar como el proceso por el cual ciertas actividades de la empresa son desarrolladas por personal externo a ella (contratistas). El proceso de subcontratación también se le denomina normalmente *outsourcing* o desintegración vertical. Normalmente la subcontratación tiene como objetivos:

- Ahorras costos
- Flexibilizar procesos
- Mejorar en la calidad del servicio al cliente (interno en el caso de Mantenimiento)

17.1. ¿Cómo definir si se debe subcontratar o no?

Una forma simple de definir las tareas que son susceptibles de ser contratadas es atendiendo la Figura 173 (*Capítulo 11*), en la cual se indica que se debe subcontratar, si el análisis de *Riesgo y criticidad* arroja que la organización posee falencias en cuanto a recursos y conocimientos.

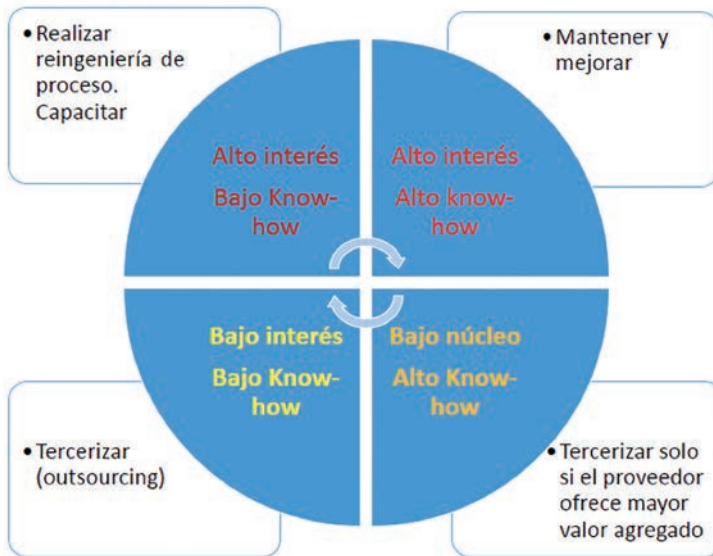
Alternativamente, un análisis del núcleo del negocio o *Core Business Anaysis* (Figura 192) indica que se debe subcontratar, si para la compañía una cierta actividad le representa poco interés y hay bajo know-how; complementariamente, se recomienda subcontratar si el proveedor ofrecerá mayor valor agregado, para actividades que la compañía tiene alto know-how y bajo interés.

Para el caso de un departamento de mantenimiento, algunas de las tareas que normalmente se subcontratan son:

- Lubricación
- Bobinado de motores
- Mantenimiento eléctrico rutinario
- Intervención de equipos o componentes electrónicos
- Mantenimiento a equipos muy especializados, donde el personal con conocimiento en el asunto es difícil de reclutar, capacitar y posteriormente retenerlo; por ejemplo en mantenimiento predictivo, mantenimiento de equipos a gas, mantenimiento de equipos especiales de refrigeración.
- Mantenimiento que requiera equipo especializado, por ejemplo, calibraciones de básculas de gran capacidad (como las de pesaje de camiones)
- Fabricaciones
- Reparaciones y alistamientos rutinarios, como es el caso de las mazas

- (superior, cañera, bagacera y cuarta) en los ingenios azucareros
- Soldaduras especializadas
- Movilización o izaje esporádico de cargas (grúas, montacargas)

Figura 192. Esencia del Core Bussiness Analysis



17.2. Ventajas y desventajas de de subcontratar en mantenimiento

Diversos autores [108], [109], [110] han realizado estudios y planteado diversas ventajas y desventajas acerca de subcontratar. A continuación se relacionan algunas de ellas.

Ventajas:

- Si se efectúan contratos “a todo costo” (mano de obra, equipos, herramientas, repuestos e insumos), se reduce la laboriosidad del personal de mantenimiento elaborando requisiciones de compra y del departamento de compras, tramitándolas. Adicionalmente, se reduce la cantidad de repuestos e insumos que deben estar en el almacén, así como el costo asociado a su almacenamiento (*ver numeral 16.7*).
- Se pueden reducir costos, ya que el servicio cubrirá estrictamente las horas-hombre requeridas
- Se pueden transformar costos fijos en variables

- Es especialmente útil en los casos de paradas mayores u overhaul; una parada mayor rebasa la capacidad del departamento de mantenimiento, durante un período corto de tiempo. La subcontratación permite atender adecuadamente el antes, el durante y el después (reparaciones) de la parada mayor
- Se libera al personal propio del estrés de ejecutar tareas monótonas o rutinarias, dedicando la atención y los esfuerzos a tareas de más importancia para la empresa
- En caso de contar con personal propio dedicado solamente a tareas especializadas, se reduce su ociosidad o tiempo muerto
- Se evita la responsabilidad y el costo de invertir en capacitación, con la dificultad que implica retener al personal con elevada experticia
- Ahorro a futuro en prestaciones sociales y liquidaciones
- Se evitan accidentes e incapacidades de personal propio
- Las demás responsabilidades como empleador se trasladan al contratista
- Se evitan ausentismos por permisos o salud. El contratista debe garantizar la prestación del servicio
- Flexibilidad al momento de decidir cambiar de contratista o querer regresar a personal propio
- Se evita invertir recursos en equipos y herramientas (especializados o no) y en su cuidado

Desventajas:

- Pérdida de *know-how* o experticia, del personal de la organización, para las tareas que hayan sido subcontratadas
- Requiere capacitar y disponer de personal propio que evalúe, contrate, supervise y audite la contratación y en caso extremo, aplique sanciones al contratista.
- Se puede crear dependencia del contratista. El departamento de mantenimiento puede llegar a estar en posición de debilidad frente al proveedor. Para evitar esto, se recomienda definir adecuadamente el contrato y disponer de varias alternativas de contratista
- De no elegir una buena empresa de *outsourcing*, se corre el riesgo de no contar con trabajadores calificados
- El nivel de compromiso de los empleados del contratista puede ser bajo en comparación con respecto a empleados propios, dado no se sienten parte de la organización. Si el trabajador contratista siente que no es parte de la empresa, puede llegar a realizar un trabajo mediocre
- Si se trata de personal especializado, puede llegar a haber mucha rotación de los ejecutantes, puesto que siempre están a la búsqueda de mejores

- oportunidades (mejor remuneradas o con más estabilidad)
- Si no se maneja adecuadamente todo el proceso con los contratistas, puede llegar a ser más traumático y costoso que si fuese con personal propio
- Se puede requerir de adecuar y proveer infraestructura y facilidades para que los contratistas puedan ejecutar su trabajo en la empresa.

17.3. Algunos criterios para tener en cuenta en el contrato de servicios

Haciendo la claridad de que cada contrato puede ser diferente a los demás (cultura organizacional, alcance, tamaño de la empresa, etc.) a continuación, se presenta una relación sucinta de los principales aspectos que se deben tener en cuenta:

- Las partes intervinientes en el contrato
- Objeto del contrato ¿Qué tipo de intervenciones y tareas incluye? ¿A cuáles equipos? ¿Qué repuestos e insumos quedan cobijados? ¿Sitios de desarrollo y entrega de las tareas? ¿Procedimiento en caso de situaciones inesperadas?
- Garantías por parte del contratista. Salarios, prestaciones laborales, seguridad social e indemnizaciones a su personal. Garantía de prestación del servicio, en caso de ausentismo, accidente o muerte del personal que normalmente desempeña la labor. Garantía de prevención de riesgos laborales y responsabilidades medioambientales. Pólizas de calidad del servicio y responsabilidad civil extracontractual
- Obligaciones del contratante. Sitios de trabajo y facilidades para el contratista, suministro de repuestos, suministro de servicios (electricidad, agua, gas, aire comprimido, etc.)
- Forma de evaluación de la calidad del servicio. Definición del interventor o supervisor. Definición de formatos de entrega de reportes de actividades, frecuencia de entrega.
- Monto del contrato, vigencia, valor, forma de liquidación parcial y forma de pago, condiciones de renovación del contrato
- Cláusulas pecuniarias en caso de incumplimiento de las partes y causales de terminación del contrato

17.4. Estimación básica de ahorro al utilizar el personal subcontratado

Si se fuese a hacer esta estimación de manera medianamente formal, para el personal propio habría que tener en cuenta:

Salario anual + subsidio de transporte, prestaciones sociales anuales, seguridad social anual, estimación cantidad y valor de horas extras requeridas

para efectuar las tareas de mantenimiento del empleado propio, dotaciones de ley, EPP, exámenes de ingreso y egreso, curso de trabajo seguro en alturas, etc.

Para el caso del personal subcontratista, habría que tener en cuenta la mayoría de los aspectos mencionados en el numeral 17.3.

Se ha planteado un ejercicio básico, para cuantificar el monto de dinero que se podría ahorrar al pasar de tener un técnico especializado propio, a uno subcontratado.

Ejemplo de costeo básico para definir entre personal propio o subcontratado

Un técnico en refrigeración industrial (personal especializado) labora en una cierta organización, y devenga 2,0 SMLV (en COP del año 2019), bajo modalidad de contrato anual. Para intervenir las máquinas, el técnico labora en promedio 2 HED diarias, de lunes a viernes y los domingos efectúa labores que en promedio le toman 6 HDD. Para intervenir sobre las máquinas debe hacer alistamientos que totalizan un promedio 20 horas / semana de su tiempo normal de labor, y por política de la empresa no labora en otro tipo de actividades que no sea refrigeración y no manejan días compensatorios (a cambio de los dominicales). No se están teniendo en cuenta factores de ausentismo por enfermedad o permisos (Capítulo 8).

Determinar preliminarmente la conveniencia de continuar con el técnico propio, o en su defecto subcontratar el servicio.

El costo preliminar del técnico para la empresa se detalla en la tabla 80 (valores en COP)-

Tabla 80. Costo preliminar mensual (para la empresa) de un técnico especializado en refrigeración

Valor devengado		\$ 1 656 232,0 (1)
Cantidad de SMLV devengados		2,0
Subsidio de transporte		\$ 97 032,0 (2)
	Valor	% SMLV
Aportes parafiscales ***		
Sena	\$ 33 124,6	2,0
ICBF	\$ 49 687,0	3,0
Caja compensación	\$ 66 249,3	4,0
Subtotal	\$ 149 060,9	9,0
Carga prestacional ***		
Cesantías	\$ 138 019,3 (3)	8,3
Prima de servicios	\$ 138 019,3	8,3
Vacaciones	\$ 69 009,7	4,2
Intereses cesantías	\$ 16 562,3 (3 A)	1,0
Subtotal	\$ 361 610,7	21,8
Seguridad social		
Salud empresa ***	\$ 140 779,7	8,5
Salud empleado	\$ 66 249,3	4,0
Pensión		
Pensión empresa ***	\$ 198 747,8	12,0
Pensión empleado	\$ 66 249,3	4,0
Riesgos profesionales ***		
	\$ 8 645,5	0,522
Costo directo preliminar mensual para el empleador		\$ 2.515.153,9 (4)

Cálculo de tiempo extra (tabla 81). Puesto que el técnico devenga por horas extras, su salario es variable (valores en COP).

Tabla 81. Cálculo de costo del tiempo extras del técnico en refrigeración

Hora ordinaria HO \$ 10.479,5	Hora extra diurna HED (1,25 HO) \$ 13 099,4	Hora festiva ordinaria HDD (1,75 HO) \$ 18 339,1
HED/año	10 x 52 = 520	\$ 6 811 665,9
HDD/año	6 x 52 = 312	\$ 5 721 799,3
Subtotal anual tiempo extra		\$12 533 465,2 (5)
Subtotal mensual tiempo extra		\$ 1 044 455,4(6)

Cálculo de adicionales. Dada la normatividad vigente en Colombia (*Capítulo 8*), anualmente la empresa deberá facilitarle y costearle al técnico la renovación del trabajo en alturas, y los demás ítems descritos en la Tabla 82.

Tabla 82. Cálculo de adicionales para técnico en refrigeración

Examen anual de ingreso	\$ 50 000
Renovación anual curso de alturas	\$ 150 000
Gastos legales de nómina	\$ 15 000
EPP básico del año - promedio (casco de seguridad, protector auditivo, guantes, calzado de seguridad,	\$ 333 800
Dotación del año	\$ 150 000
Examen anual de retiro	\$ 50 000
Subtotal anual de adicionales	\$ 748 800 (7)

Recargo de las cesantías. Puesto que se trata de un salario variable, las cesantías e intereses de las cesantías del técnico se calculan sobre la base del salario promedio devengado.

Costo del salario base = \$ 1 656 232,0 Tomado de (1) Tabla 80

Promedio valor horas extras/mes= \$ 1 044 455,4 Tomado de (6) Tabla 80

Valor del salario promedio (1) + (4) \equiv nuevas cesantías = \$ 2 700 687,4
Tomado de (8) *Tabla 80*

Incremento anual cesantías (8) - (1) = \$ 1 044 455,4
Tomado de (9) *Tabla 80*

Incremento mensual intereses a las cesantías (9) x 0,01 = \$ 10 444,6
Tomado de (10) *Tabla 80*

Costo directo total técnico / año = [(2) + (4) + (6) + (10)] x 12 + (7) + (9)
= \$ 45 798 286,2 Tomado de (11) *Tabla 80*

Horas totales pagadas al año
= 240 h/mes x 12 + [10 HED / semana + 6 HDD/semana] x 52 semana / año
= **3712 h / año** Tomado de (12) *Tabla 80*

Valor promedio hora pagada al técnico: = (11) / (12) = \$ 12 337,9
Tomado de (13) *Tabla 80*

De las 3712 h reseñadas en (12), y dadas las condiciones de la empresa, solo una parte de ese tiempo lo utiliza el técnico en “trabajo útil”:

“Horas útiles” laboradas al año = [20 + 10 + 6] h/semana x 52 semanas/año
= 1 872 h/año Tomado de (14) *Tabla 80*

Valor promedio “hora útil” técnico propio = (11) / (13) = \$ 24 464,9

Ahora bien, se supondrá que el servicio se subcontratará en estas condiciones:

- Persona natural (auto-empleado)
- Se asumirá que laborará la misma cantidad de “horas útiles” por semana, descritas en (14), es decir 1 872 h/año
- El contrato tendrá por objeto el mantenimiento preventivo – correctivo de los equipos de refrigeración de la empresa.
- Los repuesto e insumos serán suplidos por la empresa contratante, y con mínimo 15 días de antelación el contratista se compromete a presentar la relación de lo requerido, y la empresa a tramitarlos. *En este caso la empresa no tendrá ahorro por costos de almacenamiento y su administración (Capítulo*

16).

- El auto-empleado se va a pagar 2 SMLV, cumpliendo con los requerimientos descritos en las tablas [108], [109], [110], por lo tanto, el valor promedio de su hora promedio base será también del orden de \$ 12 337,9(13).
- Con respecto a la cantidad de horas dadas por (14), el contratista asumirá un factor de tiempo muerto del orden del 30% (por desplazamientos esencialmente)
- Puesto que el contrato se evaluará y liquidará mensualmente, no se le pedirán pólizas al contratista

La comparación entre una situación y otra se muestra en la tabla 83.

Tabla 83. Cálculo de adicionales para técnico en refrigeración

	Técnico propio	Técnico contratista
Valor hora promedio base	\$ 12 337,9	\$ 12 337,9
A.I.U. (30%)	N. A.	\$ 3 701,4
Subtotal hora	N. A.	\$ 16 039,3
Total anual horas brutas a pagar	3712 h	1 872 h x 1,3 = 2 433,6 h FTM del 30%
Monto total a pagar al año	\$ 45 798 286,2	\$ 39 033 168,7
Monto mensual a pagar	\$ 3 816 523,9	\$ 3 252 764,1
Valor hora neta trabajada	\$ 24 464,9	\$ 20 851,1
Ahorro anual	\$ 6 765 117,6	

Para este ejemplo simplificado es evidente la ocurrencia de un ahorro económico. Adicionalmente, y tal como se estila en la realidad, el contratista quedó comprometido con efectuar el mantenimiento preventivo – correctivo, con lo cual obviamente le interesará ejecutar lo mejor posible las tareas preventivas, con el fin de reducir la posibilidad de ocurrencia de correctivos, y los sobrecostos para Él, que ello le acarrearía.

En muchas otras situaciones reales, la subcontratación podrá ser más costosa que la ejecución con personal propio, no obstante, se tendrán algunas de las ventajas descritas en el numeral 17.2, las cuales en muchas situaciones son difíciles de cuantificar económicamente. Por último, hay situaciones en que por la especialidad de las máquinas/equipos es imperante la subcontratación para el servicio a la maquinaria, aún a pesar de lo costoso que pueda llegar a ser.

CAPÍTULO DIECIOCHO

Presupuestos de Mantenimiento

Se entiende presupuesto como el conjunto de ingresos y gastos previstos para un determinado período de tiempo. Adicionalmente, se puede entender como el cálculo anticipado del coste de una obra o un servicio, definición que se ajusta más al presupuesto de mantenimiento, puesto que se corresponde a un departamento de servicio transversal a todas las actividades de una empresa u organización.

Un departamento de mantenimiento debe presupuestar adecuadamente sus gastos, puesto que presupuestar en exceso y en defecto acarreará consecuencias negativas. Presupuestar en exceso conllevará a ejecutar presupuesto “como sea”, y evitar así que en la próxima vigencia se le apliquen recortes al departamento (caso muy típico en entidades oficiales). Presupuestar en defecto conllevará a la ocurrencia de fallas funcionales y sus consecuencias (numeral 1.3.1, Capítulo 1), y eso no garantiza que en la próxima vigencia se le asignen más recursos al departamento. Cualquiera de los dos casos animará aún más a un gerente de planta cortoplacista o inmediatista, a fijarse solo en el control del presupuesto y no en los beneficios o perjuicios de la gestión del departamento de mantenimiento.

Se debe evitar a toda costa la situación en la cual todo va “a la misma bolsa” y no hay discriminación de cuánta suma va a correctivo, cuánta a preventivo, cuánta a mano de obra, cuánta a repuestos, cuánto a un área u otra, etc. Un gerente cortoplacista opinará que hay que reducir, pero el encargado de mantenimiento difícilmente podrá saber en qué hay que reducir...

Pensado tanto en compañías establecidas, como en compañías jóvenes o a punto de ser puestas en marcha, las proyecciones de ampliaciones o reducciones (planta física, producción, portafolio de productos, sucursales comerciales, portafolio de clientes, ventas, etc.), influyen directamente en los aumentos o recortes de los presupuestos generales (incluyendo mantenimiento), por lo tanto, los cambios en los presupuestos generales no deberían ser tácticos, sino estratégicos. En otras palabras, los cambios presupuestales importantes deberían corresponder fundamentalmente a planeaciones cuando menos quinquenales y no anuales como se acostumbra en muchas organizaciones.

18.1. Clasificación costos de mantenimiento

Existen diferentes formas de clasificar los costos en mantenimiento, fijos y

variables, directos e indirectos, generales, de aplazamiento.

Costos Fijos CF: aquellos en que se incurre, haya o no haya producción. Ejemplo, arrendamientos, nómina de personal fijo, impuestos, vigilancia.

Costos variables CV: aquellos que en principio dependen de que haya o no haya producción. Teóricamente, para una producción 0, deben valer 0. En principio el costo de mantenimiento de una organización debe ser variable, tal como se acotó en el *Capítulo 1, numeral 1.3.3*. No obstante, al evaluar su composición, aparecen costos fijos y costos variables. La suma de CF y CV arroja los costos totales CT.

Costos directos CD: Aquellos que guardan estrecha relación con el desarrollo de una actividad, y son en principio fácilmente cuantificables. Para el caso de mantenimiento, están asociados a costos de mano de obra directa, materiales y repuestos, subcontratación.

Costos indirectos CI: Aquellos que no están estrechamente relacionados con el desarrollo de una actividad en particular, sino que dependen o son consecuencia de una o varias actividades. Su cuantificación es más compleja que la de los costos indirectos CI. Para el caso de mantenimiento están relacionados con paradas de producción, baja eficiencia, desperdicios, mala calidad, sanciones por demoras en la entrega de producto, pérdidas de ventas, afectación a *goodwill*, etc. El personal de mantenimiento debe ser plenamente consciente de las consecuencias que su pobre gestión tiene sobre la producción y el buen desempeño de la empresa, y de que, para racionalizar estos costos, primero debe comprenderlos.

Un costo indirecto típico es la hora de parada de planta HPP, con la cual muchos gerentes de planta y con sobrada razón “azotan” a los jefes de mantenimiento cuando ocurre una falla funcional. Un valor rápido, pero no completo de la hora de parada de planta de planta se puede estimar haciendo uso de la fórmula 47:

$$HPP = PV \times RTP \quad (47)$$

Donde

HPP es el valor de la hora de parada de planta,

PV es el precio de venta de unidad de producción (\$/ud);

RTP es la rata o razón teórica de producción (ud/h).

Costos generales: Son aquellos que no pueden atribuirse de manera directa a una operación o labor específica. Por ejemplo, supervisión general, almacén,

administración, vigilancia. Para el caso de mantenimiento, están asociados con el prorrateo o distribución de los costos asociados con los procesos de compras, con la administración del almacén general.

Costo de posponer el mantenimiento: corresponde a la predicción de la consecuencia económica de no realizar una cierta actividad de mantenimiento. Es un ejercicio un poco complejo, en el que se evalúa el costo asociado a la consecuencia de no realizar una determinada tarea de mantenimiento, por ejemplo, HPP, daños a las máquinas/equipos, afectación a la calidad, horas extras para reparar, subcontratación de personal, repuestos e insumos, etc.

18.2. Rubros generales que se deben incluir en un presupuesto de Mantenimiento para una planta ya establecida

Teniendo en mente la *tabla 2. Actividades básicas del mantenimiento (Capítulo 1)*, la *Figura 173. Selección de un modelo de mantenimiento (Capítulo 11)* y un modelo de mantenimiento de alta disponibilidad – el más complejo - (*Tabla 48. Panorama de los modelos de mantenimiento*), fácilmente se puede reconocer que un departamento de mantenimiento debe presupuestar gastos estratégicos y gastos operativos, de acuerdo con lo descrito en los *numerales 18.1.1 y 18.1.2*.

18.2.1. Presupuesto estratégico

- Recursos para atender proyectos de instalación de nuevas líneas de proceso, máquinas o equipos de producción o servicio, y proyectos para modificar la distribución en planta actual (reubicación de máquinas o equipos de producción o servicio). Estos recursos incluyen lo relacionado con:

El montaje y puesta a punto de las nuevas instalaciones. Costo de dar de baja máquinas/equipos obsoletos o que llegaron al final de su vida útil. Ampliación o adecuación de la infraestructura física. Personal puntual (propio o subcontratado) para el montaje. Equipos para izaje y movilización de máquinas/equipos. Ampliación de los servicios requeridos por la nueva maquinaria y las nuevas instalaciones (energía eléctrica, líneas de gas/aire comprimido/vapor u otros fluidos)

- Recursos relacionados con el mantenimiento de nuevas líneas de proceso, máquinas o equipos de producción o servicio. Nuevo personal propio o subcontratado para mantenimiento y su capacitación, incrementos en repuestos y materiales. Incremento de equipos de apoyo y herramientas para la ejecución de mantenimiento. Modificación o ampliación de talleres

o locaciones para la ejecución de mantenimiento.

- Costos y gastos asociados a paradas generales, puestas a cero u overhaul
- Costos y gastos asociados a modificaciones importantes a máquinas
- Adquisición y mantenimiento de nuevos equipos y herramientas para desarrollar las tareas de mantenimiento

La sustentación de un presupuesto estratégico se convierte fácilmente en la formulación y evaluación de un proyecto, labor que deberá ser desarrollada de manera conjunta por los departamentos financieros, mantenimiento, salud ocupacional, etc., con o sin asesoría externa.

18.2.2. Presupuesto programado

Esto hace referencia a todos los costos relacionados a la aplicación de modelos correctivos, condicionales o sistemáticos. Debe contemplar los costos asociados a la atención de:

- Las actividades que de acuerdo con planes de mantenimiento están programadas, tales como: listados de requerimientos LEMI (*Capítulos 3 y 13*), rutas de mantenimiento predictivo (*Capítulos 4 y 13*), actividades propias de la implementación de Mantenimiento productivo Total TPM (*Capítulos 5 y 13*)
- Correctivos de emergencia. Los indicadores (*Capítulo 12*) convenientemente manejados permiten estimar una frecuencia con base a indicadores

El presupuesto programado incluye mano de obra (propia o subcontratada), repuestos e insumos, mantenimiento de equipos y herramientas, capacitación de personal, etc.

18.3. Técnicas para la elaboración de presupuestos

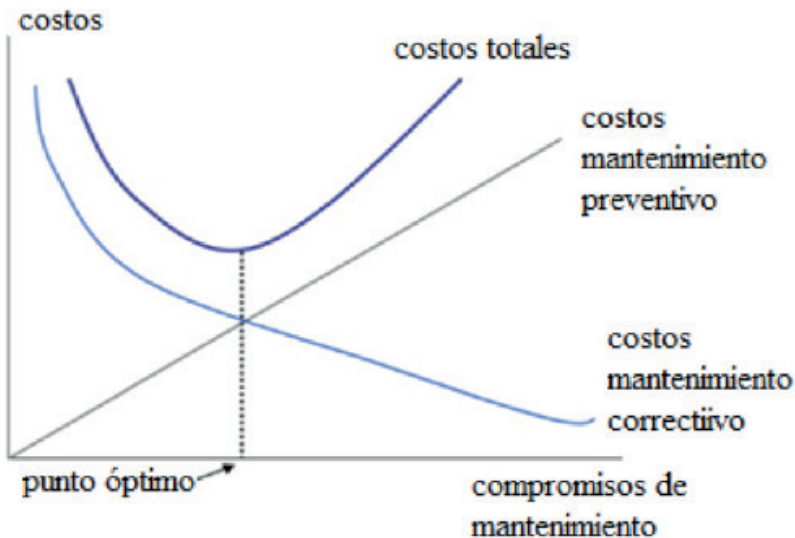
A continuación, se presenta una breve relación de algunas técnicas para elaborar un presupuesto de mantenimiento, las cuales se subdividen en técnicas informales, adaptables y formales.

Las técnicas informales son sencillas, pero no son útiles para evaluar tendencias en el tiempo. No contemplan los cambios en el sistema.

Las técnicas adaptables tienen en cuenta las modificaciones periódicas, pero no necesariamente lo ocurrido en el año anterior.

Las técnicas formales discriminan los tipos de costos, intervenciones y gestiones. Su planificación demanda mucho tiempo, y son útiles para hacer optimizaciones como las mostradas en la Figura 193. En caso de reducciones del presupuesto en momentos coyunturales, permitirá definir donde reducir y el riesgo asociado a dicho cambio.

Figura 193. Curva de costo total mínimo Tomado de [108]



18.3.1. Presupuesto invariable o uniforme (Técnica informal)

Corresponde a la técnica más simple de todas. Básicamente en el período a presupuestar se emplea el mismo recurso empleado en el período anterior. Ignora la inflación, los cambios físicos, operativos y administrativos en la empresa (aumento de área física, incrementos en las ventas, incrementos en el número de usuarios, maquinaria nueva, etc.).

18.3.2. Mano de obra más adquisiciones (técnica informal)

Tiene en cuenta nuevas necesidades, pero considera constante el costo de la mano de obra, lo que conlleva a reducciones indebidas de personal.

18.3.3. Factor fijo de las inversiones (técnica adaptable)

Se elabora con base a la premisa de que el costo de mantenimiento es proporcional al valor de las inversiones hechas en la planta. Desconoce la relación entre la edad de las máquinas/equipos y la cantidad y costo de las tareas que se le deben efectuar (ver Figura 21, Capítulo 1).

18.3.4. Factor ajustable de las inversiones (técnica adaptable)

Esencialmente, se basa en el mismo concepto aplicado en 18.3.3, simplemente hace ajustes al presupuesto uniforme planteado allí.

18.3.5. Registro histórico ajustado (técnica adaptable)

Toma como base los valores gastados en periodos anteriores (históricos) y los ajusta de acuerdo con precios, requisitos de los materiales y servicios, cambios en los costos directos e indirectos de la mano de obra y programas sistemáticos a implementar. Es un método efectivo en el sentido de que se basa en datos reales de la planta, pero puede llegar a no estimular factores de mejoramiento.

18.3.6. Presupuesto por tipo de costo (técnica formal)

Discierne los distintos rubros o centros de costo dentro del presupuesto total. Los rubros varían con base en las funciones ejecutadas por un área de mantenimiento en particular.

18.3.7. Presupuesto por sección (técnica formal)

Aplicable para organizaciones con organigramas centralizados y descentralizados (Figuras 32 y 33 del Capítulo 2). Cada jefe de taller o área de mantenimiento prepara por separado su presupuesto.

18.3.8. Presupuesto por tipo de intervención

El presupuesto se determina para cada tipo de actividad (correctivo, preventivo, predictivo, modificaciones, etc.).

18.3.9. Presupuesto por costo incorporado al producto (técnica formal)

Se basa en la determinación histórica y el correspondiente objetivo del precio incorporado al producto que se maneja, debido a los costos de mantenimiento en todo el proceso. Todas las dependencias de esta organización trabajan sobre esta base.

18.4. Principales rubros que deben tenerse en cuenta al elaborar un presupuesto de mantenimiento

A continuación, se detallan los principales rubros a tener en cuenta. Es importante identificar al máximo los costos directos, con el fin de reducir las cifras asociadas a costos generales.

- a. Costes de implantación o movilización
- b. Coste anual de personal de mantenimiento
 1. Anualidad de los empleados
 2. Primas horas extras / Bonificaciones por grandes paradas
 3. Costos sociales obligatorios
 4. Capacitación
 5. Gastos de personal
- c. Coste anual en repuestos y consumibles (ver Capítulo 16)
 6. Repuestos. Es conveniente tener en cuenta que hay industrias específicas en las cuales hay uso intensivo de partes de desgaste, como es el caso de la industria minera, o para los equipos fuera de carretera (retroexcavadores, buldóceres, cargadores, etc.)
 7. Consumibles: Aceites y lubricantes, Filtros de aire, aceite, etc.; elementos de estanqueidad; diverso material de ferretería; diverso material eléctrico; consumibles de taller; ropa de trabajo; elementos de seguridad; combustible para vehículos; otros materiales
- d. Coste anual en adquisición, reposición y mantenimiento herramientas y medios técnicos
- e. Alquiler de equipo. En general, los medios alquilados suelen ser aquellos que no se utilizan de forma continua en la planta, y que por tanto, la frecuencia de

su uso desaconseja su adquisición. Suele tratarse, en la mayoría de los casos de medios de elevación y transporte tales como: grúas, sistemas de izaje

f. Coste anual en contratos externos

g. Asistencias externas

Los trabajos que habitualmente se contratan a empresas externas son los siguientes:

- Mano de obra de servicios generales. Esta mano de obra adicional permite flexibilizar la plantilla de manera que el departamento pueda dimensionarse para una carga de trabajo determinada, y cubrir los momentos de mayor necesidad de mano de obra con personal externo.
- Mano de obra contratada de forma continua a empresas de servicios generales. Habitualmente, junto a la plantilla habitual hay personal subcontratadas para el trabajo habitual, lo que permite disminuir la plantilla propia.
- Mano de obra especializada, de fabricantes (incluidos gastos de desplazamiento), para mantenimiento correctivo y programado
- Trabajos en talleres externos (bobinado de motores, fabricación de piezas, etc.)
- Servicios de Mantenimiento que deban ser realizados por empresas que cumplan determinados requisitos legales, y que puedan emitir una certificación de haber realizado determinados trabajos.

h. Coste de paradas y grandes revisiones

i. Coste de proyectos de ampliación o modificación de planta

j. Seguros, franquicias y límites de responsabilidad

k. Imprevistos

l. Resumen de partidas que forman parte del presupuesto

m. Incrementos de coste a lo largo de la vida de la planta (por los factores de obsolescencia, inadecuación e ineficacia)

18.5. Ejemplo de cálculo básico de un presupuesto de mantenimiento

A continuación, se propone un ejemplo de elaboración de presupuesto básico (no optimizado) de mantenimiento para una empresa del sector metalmeccánico, en la cual los mantenedores atienden labores de lubricación, ajuste, reparación de las máquinas, y adicionalmente hacen la reparación y alistamiento de los diferentes utillajes o herramientas.

La técnica de elaboración del presupuesto será adaptable, basada en registro histórico ajustado.

Se tratarán de aplicar diversos conceptos vistos a lo largo del presente libro texto, y es conveniente enfatizar que se trata de un presupuesto “básico”, con el objetivo de dar al estudiante una idea general de su elaboración, mucho más simplificada de la que podría aportar un financiero o un administrador de empresas. Los diferentes cálculos se efectuarán en hoja electrónica Excel, y para propósitos de comprensión se tratará de presentar su paso a paso (diferente del tradicional cuadro Excel colmado de cifras).

Se presume que los diferentes datos presentados son tomados, una parte del software de mantenimiento, otros son aportados por el departamento de Salud ocupacional, otros por el departamento de compras, otros por el departamento de producción y otros por la división financiera.

Enunciado

Una mediana empresa del sector manufacturero, cuyos activos fijos de maquinaria y equipos tienen un valor remanente del orden \$12 000 000 000, desea elaborar un presupuesto de mantenimiento para el año 2020, y está tomando como base los históricos de mantenimiento del año 2019 y adicionalmente desea efectuar una proyección de presupuesto para el año 2021.

18.5.1. Mantenimiento estratégico (asociado a la ampliación de la planta)

La empresa formuló, evaluó y ejecutó un *proyecto especial* con el cual pretende ampliar la planta y poner al servicio una línea de montaje para un nuevo producto. Dicho proyecto tuvo un costo de \$6 000 000 000. La línea nueva se dará al servicio en enero de 2020, y como las máquinas son nuevas, el primer año estarán en garantía, no obstante, la empresa ha decidido que capacitará su personal, para que aprenda durante las visitas del distribuidor autorizado, y en el segundo año su personal propio se encargue del mantenimiento. No se sabe cuánto personal nuevo se necesite para

atender el mantenimiento de la línea nueva, pero la gerencia de la planta desea que el primer año se vincule la mitad de dicho personal, con una asignación de 1,8 SMLV + horas extras (en caso de ser necesario).

En el *proyecto especial* de ampliación, se encargó que hiciesen un estudio de la cantidad de horas-hombre de mantenimiento que demandaría la maquinaria nueva, arrojando una cantidad del orden de 3000 h /año y una cantidad de repuesto e insumos, cuyo valor promedio inicial será del orden de \$ 120 000 000/año, tal como se muestra en la tabla 84. Esta cantidad se corresponde con lo reportado por [107], quien declara como un criterio de referencia, que el costo de mantenimiento de las maquinarias más modernas es del (2 - 3) % de su valor como activo fijo, y de dicha cantidad, 2/3 partes están representadas en repuestos e insumos. El incremento del costo indirecto de compra y almacenamiento de repuestos e insumos se ha estimado en \$ 6 000 000 (prorratio de fracción de tiempo empleado en el proceso de compra, más fletes, más funcionario de almacén, más movilización de componentes y vigilancia – *Capítulo 16*).

Como un comentario adicional, y tal como se ha planeado en este ejercicio, los planes de mantenimiento para maquinaria nueva se deben elaborar antes de que entre en operación la planta, con el fin de que como se dice coloquialmente, “*las máquinas/equipos no cojan ventaja*”.

Para la estimación *básica* de la CTM global de la maquinaria nueva, se estudiaron los manuales y catálogos de las máquinas nuevas, se elevaron consultas al distribuidor, se analizaron las informaciones y se hizo uso de la fórmula **40** (descrita en el *numeral 15.4*).

$$CTM = HHS + HHC + HHT + HHSa \quad (40)$$

Tabla 84. Estimación de consumo de repuestos de la maquinaria nueva

Partes o repuestos	Clasificación	Estimación 2020
Estopas, detergentes, telas de limpieza, filtros, lubricantes, limpiadores de contactos, etc.	Accesorios de apoyo	\$ 7 200 000,0
Empaques y mangueras	Repuestos estandarizados – Material de apoyo	\$ 3 600 000,0
Bujes y racores	Repuestos estandarizados	\$ 9 600 000,0
Rodamientos, correas, empaques de cilindros	Repuestos estandarizados	\$ 12 000 000,0
Chumaceras, engranajes, cilindros	Repuestos estandarizados	\$ 9 600 000,0
Partes de desgaste de las máquinas (dados, matrices, etc.)	Repuestos específicos o repuestos-máquina	\$ 68 400 000,0
Tuercas, tornillos, tubos, bombillas, pintura	Accesorios y material de apoyo	\$ 2 400 000,0
Componentes electrónicos	Repuestos específicos o repuestos-máquina	\$ 7 200 000,0
Total =		\$120 000 000,0

18.5.2. Mantenimiento sistemático

Los mantenedores actuales devengan del orden 2 SMLV más horas extras. La jornada oficial de labor de 8 h diarias, 26 días al mes y 52 semanas por año (cada persona toma las vacaciones cuando se le cumpla el año de labor), y en promedio laboran 2 HED diarias. El jefe de mantenimiento tiene declarado en sus listados de requerimientos (Capítulo 3) y en sus cronogramas de Mantenimiento (Capítulo 13) una CTM de 4680 h/año, y actualmente cuenta con 3 ejecutantes de mantenimiento.

En relación con el personal, la empresa maneja las siguientes estadísticas:

Factor de tiempo muerto FTM = 30% (Capítulo 15)

Factor de ausentismo por permisos FAu = 3% (fórmula 22, Capítulo 8)

Factor de accidentalidad FA = 10% (en línea con las estadísticas del sector manufacturero colombiano 2017 – Capítulo 8)

Factor de vacaciones FV = 4,1% - 15 días de vacaciones por cada 365 días de labor (Capítulo 15)

Adicionalmente, la gerencia de planta ha pedido un informe de necesidades de capacitación del personal de mantenimiento, de su posible costo y proveedor

Tabla 85. Estimación de consumo de repuestos de la maquinaria usada

Partes o repuestos	Clasificación	Valor Promedio 2019
Estopas, detergentes, telas de limpieza, filtros, lubricantes, limpiadores de contactos, etc.	Accesorios de apoyo	\$ 12 000 000,0
Empaques y mangueras	Repuestos estandarizados Material de apoyo	\$ 3 600 000,0
Bujes y racores	Repuestos estandarizados	\$ 12 000 000,0
Rodamientos, correas, empaques de cilindros	Repuestos estandarizados	\$ 12 000 000,0
Chumaceras, rodamientos, engranajes, cilindros	Repuestos estandarizados	\$ 48 000 000,0
Partes de desgaste de las máquinas (dados, matrices, etc.)	Repuestos específicos repuestos-máquina	\$ 92 400 000,0
Tuercas, tornillos, tubos, bombillas, pintura	Accesorios y material de apoyo	\$ 3 600 000,0
Componentes electrónicos	Repuestos específicos repuestos-máquina	\$ 7 200 000,0
Taladros, llaves de tubo, equipo de soldar, machuelos	Herramientas	\$ 7 200 000,0
Total =	\$	198 000 000,0

En consultas hechas a la división financiera, acerca del costo de los consumos de repuestos e insumos en el año 2019, fue entregada la información presentada en la tabla 85. Estos resultados están en concordancia con el mayor valor de los activos fijos, con su edad y con la relación propuesta por [107], en el sentido que las maquinarias más antiguas son más intensivas en mano de obra, y la relación de costos de mano de obra y repuestos es aproximadamente 50/50 (del 2-3 % del valor de las máquinas como activos fijos). El incremento del costo indirecto de compra y almacenamiento de repuestos e insumos se ha estimado en \$ 11 880 000 (prorrato de fracción de tiempo empleado en el proceso de compra, más fletes, más funcionario de almacén, más movilización de componentes y vigilancia – *Capítulo 16*).

Para las labores relacionados con mantenimiento electrónico y de instrumentación, la empresa maneja un contrato por outsourcing por un valor \$3 600 000/mensuales, el cual es suplido por un Técnico Mecatrónico, y cubre solo la mano de obra de mantenimiento preventivo y correctivo. Los repuestos e insumos necesarios los debe colocar la empresa.

18.5.3. Estimación del presupuesto

Relacionado con mantenimiento estratégico

Puesto que se conoce la CTM global, se debe efectuar una estimación *básica* de la CTM corregida, de acuerdo con lo indicado por la fórmula 41 (*descrita en el numeral 15.4*).

$$CTM_{corr} = CTM \times FTM \times FAu \times FA \times FV \quad (41)$$

Una vez conocida la CTM_{corr} , complementando y haciendo uso de la fórmula 42 (descrita en el numeral 15.4), se podrá hacer una estimación más realista de la cantidad y especialidad de los ejecutantes de mantenimiento requeridos.

$$No\ ejec = \frac{CTM_{corr}}{HJ} \quad (42)$$

Personal nuevo requerido por mantenimiento

Aplicando los mismos factores para el personal, descritos en 18.5.2

CTM = 3 000 h/año.

$CTM_{corr} = 4\,600,3$ h/año Aplicando (41)

Dando continuidad a la jornada laboral de 8 horas / jornada

❖ **No ejecutantes nuevos = 1,8 ≈ 2 ejecutantes**, de los cuales para el año 2020 se contratará 1, y en el año 2021 el otro. Aplicando (42)

Valor básico del funcionario nuevo

Aplicando un procedimiento similar al mostrado en la tabla 78, con un 1,8 SMLV, el costo preliminar del nuevo mantenedor es \$ 2 263 238,5/mes.

Asumiendo que continuará la tendencia descrita en **18.3.2** (2 HED en promedio por día laboral), el costo mensual del tiempo extra (ver tabla 79) es \$ 613 049,9 / mes.

El salario mensual variable es \$ 2 876 688, 5

Los incrementos en las cesantías y en los intereses a las cesantías son respectivamente \$613 049,9 y \$6 130,5.

Los adicionales descritos en el *Capítulo 17* son los mismos calculados en la tabla 80, es decir, \$ 748 800.

❖ **Por último, el costo del mantenedor nuevo es \$ 37 120 061,3**

Relacionado con mantenimiento sistemático

Verificación personal actual de mantenimiento

CTM = 4 680 h/año.

CTM_{corr} = 7 175,8 h/año Aplicando (41)

Dando continuidad a la jornada laboral de 8 horas / jornada

- ❖ **No ejecutantes nuevos = 2,9 ≈ 3 ejecutantes.** Actualmente hay 3, lo que indica que el personal no está sobrecargado.
Aplicando (42)

Valor básico de los 2 ejecutantes

Aplicando un procedimiento similar al mostrado en la tabla 78, con un 2,0 SMLV, el costo preliminar de los dos funcionarios es \$ 5 030 307,8/mes.

Asumiendo que continuará la tendencia descrita en **18.3.2** (2 HED en promedio por día laboral), el costo mensual del tiempo extra (ver tabla 79) de ambos ejecutantes es \$ 1 362 333,2 / mes.

El salario mensual variable de cada uno es \$ 3 196 320, 5

Los incrementos en las cesantías y en los intereses a las cesantías son respectivamente \$681 166,6 y \$6 811,7.

Los adicionales descritos en el *Capítulo 17* son los mismos descritos en la tabla 80, es decir, \$ 748 800.

- ❖ **Por último, el costo de los 2 mantenedores es \$ 82 063 873,2**

Plan de capacitación

En relación con el Plan de capacitación, el jefe de mantenimiento mencionó que “honestamente solo se había preocupado por efectuar las capacitaciones de ley”. En consultas con Recursos humanos, se comprometieron a que conjuntamente deberían responder las preguntas descritas a continuación, lo cual deberá de dar luces sobre las necesidades de capacitación:

- a. Una vez ocurrida una falla ¿el diagnóstico es rápido y certero? (No o casi nunca, algunas veces, muchas veces, todo el tiempo)
- b. ¿La calidad de los trabajos de mantenimiento/aseo/sanidad (para los

equipos de interés) y el nivel de satisfacción de los usuarios (internos/ externos) son buenos? (No o casi nunca, algunas veces, muchas veces, todo el tiempo)

- c. ¿Solo alguna/as personas del departamento de mantenimiento lo saben todo? (Sí, ¿cuántos y quiénes?, No, ...)
- d. ¿Todas las personas del departamento de mantenimiento saben “algo”? (Sí, ¿cuántos y quiénes?, No, ...)
- e. ¿Para las mismas tareas, los niveles de rendimiento de diversos ejecutantes son diferentes? (Sí, ¿cuántos y quiénes?, No, ...)
- f. ¿Se asimilan bien los cambios tecnológicos? (No o casi nunca, algunas veces, muchas veces, todo el tiempo)

Si las respuestas son: **a) NO, b) NO, c) Sí, d) NO, e) Sí y f) NO**, es indicativo de que se requiere capacitación del personal de mantenimiento, en una o varias de las siguientes áreas:

- a. Conocimiento general del mantenimiento
 - b. Conocimiento estratégico del mantenimiento
 - c. Conocimiento del oficio del mantenimiento
 - d. Conocimiento del oficio del mantenimiento, en campos específicos (por ejemplo, Instalaciones y equipos de gas, lubricación, refrigeración y aire acondicionado, etc.)
- ❖ Solo una vez ejecutado el ejercicio anterior, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se podrá definir un Plan de Capacitaciones anual pertinente. En otras palabras, este rubro del presupuesto quedará pendiente.

En la tabla 86 se puede apreciar el presupuesto para los 3 años de interés. En amarillo, se han resaltado los rubros que impactaron el presupuesto en los años 2019 y 2020.

Tabla 86. Presupuesto de Mantenimiento años 2019, 200, 2021

	Año 2019	Año 2020	Año 2021
Inflación proyectada	-	7%	6%
I. Mantenimiento estratégico			
Adquisición + montaje planta	\$ 6 000 000 000,0	\$ 0	\$ 0
Modificación planta	\$ 0	\$ 0	\$ 0
I.1 Costos directos	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Mano de obra propia			
Anualidad de los empleados /S.S./ P.S.	\$ 0	\$ 27 163 662,0	
Tiempo extra / bonificaciones	\$ 0	\$ 7 356 598,8	
Gastos de personal	\$ 0	\$ 2 599 799,9	\$ 0
Capacitación	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Mano de obra subcontratada			
Contrato mantenimiento electrónico	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Repuestos e insumos			
Empaques y mangueras	\$ 0	\$ 3 600 000,0	\$ 0
Bujes y racores	\$ 0	\$ 9 600 000,0	\$ 0
Rodamientos, correas, empaques de cilindros	\$ 0	\$ 12 000 000,0	\$ 0
Chumaceras, engranajes, cilindros	\$ 0	\$ 9 600 000,0	\$ 0
Partes de desgaste de las máquinas (dados, matrices, etc.)	\$ 0	\$ 68 400 000,0	\$ 0
Tuercas, tornillos, tubos, bombillas, pintura	\$ 0	\$ 2 400 000,0	\$ 0
Componentes electrónicos	\$ 0	\$ 7 200	\$ 0

Si se exceptúa la inversión del proyecto inicial, se podrá apreciar el gran impacto o perturbación que tendrá en el presupuesto de mantenimiento del año 2020, el incorporar la manutención de la maquinaria nueva. Presumiendo una proyección de ventas aproximadamente constante del año 2020 al año 2021, el presupuesto comenzará a estabilizarse, lo cual es una constante búsqueda de las gerencias de planta.

18.6. Control de presupuesto

Algunas de las premisas que se deben tener en cuenta para evaluar y controlar el presupuesto de mantenimiento son:

- La concepción de los centros de costo debe estar bien estructurada, con el fin de poder evaluar por separado cada rubro y no como “como una bolsa común”, donde *se echa de todo*.
- En la medida que la compañía posea software contable y de mantenimiento (o corporativos *numeral 3.2.10*), debidamente concatenados, las tareas de elaboración, seguimiento, evaluación y control de los presupuestos serán menos laboriosos
- Si el presupuesto ha sido concebido como adaptable, los imprevistos

deberán ser incorporados al presupuesto, en caso contrario no, con todos los traumatismos que ello puede acarrear

- Al momento de efectuar el presupuesto, y si no se conocen patrones de fallas, se puede y debe utilizar un factor de recargo, el cual será más grande en la medida que más se desconozco el proceso
- Se deben realizar evaluaciones mensuales de resultados, con el fin de evaluar lo ocurrido versus lo presupuestado, y plantear ajustes al presupuesto. En las reuniones mensuales se deben evaluar las desviaciones por centro de costo, y tomar los correctivos necesarios
- Se debe tener mucho cuidado con los prorrateos de los gastos generales, con el objetivo de no cargar o descargar indebidamente algún centro de costo
- Para un control adecuado del presupuesto, mantenimiento debe trabajar de manera mancomunada y colaborativa con los departamentos de compras, almacén y financiero, con el objetivo de discernir adecuadamente los centros de costo y las diferencias a que haya lugar
- En la visión del gerente de planta promedio, se evalúa inicialmente el valor global del costo de mantenimiento, pero posteriormente el jefe de mantenimiento debe desglosar, explicar y justificar por separado cada concepto de gasto (mano de obra, repuestos e insumos, costos indirectos, costos generales, etc.)
- En la medida que pasa el tiempo, el gerente/jefe/encargado deberá aplicar conceptos y metodologías de ingeniería de mantenimiento, con el fin de racionalizar y optimizar su trabajo

CAPÍTULO DIECINUEVE

Introducción a la Gestión de activos

“Los activos son fundamentales para una organización. Administrarlos de manera controlada optimiza costos y riesgos, permite tomar decisiones basadas en hechos y en el momento oportuno y otorga valor al alcanzar sus objetivos” [112].

Por diversos factores (Tecnologías de la informática y las telecomunicaciones TIC, restricciones financieras, expectativas de rendimiento elevadas, gestión del riesgo, etc.) los ambientes de desempeño de las industrias son altamente cambiantes y competitivos, obligando a las empresas a desarrollar estrategias y metodologías que las lleven a optimizar sus procesos, garantizando la calidad de sus productos o servicios [113].

Tradicionalmente, mediante planeaciones tácticas, muchas empresas se centran en garantizar el desarrollo de sus operaciones, con el apoyo de mantenimiento quien asegura que sus activos funcionen adecuadamente, dejando de lado las actividades de planeación, administración y racionalización, bajo una mirada integradora y de largo plazo.

En el área de ingeniería de mantenimiento, la gestión de activos (*Asset management*) aplicando planeaciones estratégicas, propende a que las empresas obtengan el máximo beneficio posible de sus activos fijos (bienes y recursos), a lo largo de todo su ciclo de vida, coadyuvando a agregar valor a sus procesos. Una gestión de activos eficiente se debe traducir en confiabilidad, rentabilidad, optimización de inversiones y generación de nuevas oportunidades de mercado.

La norma ISO 55002:2018 traza un derrotero para que las organizaciones integren todos los indicadores posibles en pos de maximizar la obtención de valor de sus activos, alcanzando un equilibrio entre riesgo, costos y desempeño, con el fin de asegurar el cumplimiento de la misión, objetivo y metas estratégicas de la organización, potenciando además la elección de oportunidades futuras que proporcionarán el mayor retorno a la organización. La norma ISO 55000:2014 integra en un sistema de gestión otras normas que anteriormente se manejaban por separado: de Gestión de la Calidad ISO 9001:2015, de Gestión Ambiental ISO 14001:2015, Gestión de la Salud y Seguridad ocupacional ISO 18000:2008, de Gestión del riesgo ISO 31000:2018, de eficiencia energética ISO 50001:2018, principalmente.

Sin importar el tamaño de la empresa, la Gestión de activos con la Norma ISO 55501 es aplicable a todas las organizaciones con uso intensivo de activos,

públicas o privadas, con activos tangibles o intangibles. Particularmente se aplica a organizaciones que tienen el objetivo de mejorar el valor de sus activos o las organizaciones que gestionan activos de clientes pueden aprovechar un sistema de gestión de activos que cumple con Normas Internacionales. Entre otros ejemplos de dichas organizaciones se encuentran:

- Sectores de infraestructura e industriales (energía, red eléctrica, gas, agua y aguas residuales, telecomunicaciones, propiedad, ferrocarriles, tránsito urbano, calles comerciales, ...)
- “Servicios públicos” orientados a la infraestructura (aeropuertos, centros comerciales, hospitales, carreteras, ...)
- Todos los sectores económicos donde los organismos estatales regulan producción o servicios
- Industrias de uso intensivo de capitales y compañías de gran valor añadido (minería, petroquímica, manufacturera, etc.)
- Organizaciones de servicios (software, consultoría, servicios profesionales, etc.)

Al igual que en los sistemas de mantenimiento más evolucionados (TPM; RCM; RBM), la gestión de activos es un asunto de todos y abarca: diseño, desarrollo, gestión de contratos, adquisición, cadena de suministros, operaciones, mantenimiento, relaciones públicas, servicios al cliente, recursos humanos, riesgos, control de documentos y datos, salud, seguridad y ambiente, asuntos legales, financieros, propiedad intelectual entre otros. Un sistema de gestión de activos desarrolla una relación de colaboración y compromiso entre estas disciplinas en el desarrollo de un sistema de gestión de activos.

19.1. Definiciones básicas

Activo: algo que tiene un valor potencial o real para una organización.

Nota del Autor: específicamente activos máquinas, equipos, vehículos e infraestructuras, con las cuales una organización desarrolla sus objetivos y cumple su misión. Hay activos que son el producto en sí mismos (edificaciones, infraestructuras), y hay activos que generan el producto o servicio (máquinas, equipos, vehículos, instrumentos para prestar servicios, etc.)

Asset management: o gestión de activos, es la actividad coordinada de una organización para obtener el valor de los activos.

BSI PAS 55 *Optimized Management of Physical Infrastructure Assets*. Estándar que propende a adelantar actividades y prácticas sistemáticas y coordinadas a través de las cuales una organización administra de manera óptima y sostenible sus activos y sistemas de activos, su desempeño, riesgos y costos asociados durante su ciclo de vida con el propósito de alcanzar su plan estratégico organizacional.

Nota del Autor: la principal diferencia entre el PAS 55 y la norma 55000, radica en que el primero se centra fundamentalmente en los activos físicos, mientras que la norma ISO 55000 atiende también los activos financieros y organizativos.

Capex (*capital expenditure*) Las inversiones en bienes de capital o gastos en capital son inversiones de capital que crean beneficios. Los *capex* son utilizados por una compañía para adquirir o mejorar los activos fijos tales como equipamientos, propiedades o edificios industriales.

Ciclo del activo: todas las etapas o fases que el activo atraviesa a lo largo de su vida.

Nota del Autor: el ciclo del activo comprende necesidad, diseño, construcción, comisionamiento, operación, mantenimiento y desincorporación.

Comisionamiento (*commissioning*): El comisionamiento o Commissioning es el conjunto de actividades necesarias para verificar que el proyecto ejecutado cumple con los requisitos (OPR) definidos inicialmente por el Promotor, y a las exigencias operativas y criterios funcionales del operador. En palabras más simples, es la aplicación de protocolos de pruebas para garantizar que el proyecto quedó operando adecuadamente.

Norma ISO 55000/50001/50002 (*Asset Management*): Norma que define los requisitos para un sistema de gestión, para la gestión de activos.

ISO 55000 Gestión de Activos – Visión General, principios y terminología

ISO 55001 Gestión de Activos – Requerimientos

ISO 55002 Gestión de Activos – Guía para la aplicación de la ISO 55001

La Norma ISO 55001 utiliza un proceso estructurado, eficaz y eficiente que conduce a la mejora continua y a la creación de valor en ejecución al gestionar costos, desempeño y riesgos. Las Normas ISO 55000 y 55002 complementan la Norma ISO 55001 al proveer los aspectos generales, los principios y la terminología (ISO 55000) y las directrices para su aplicación (ISO 55002). Esta norma se enfoca en la necesidad de un sistema de gestión, y por lo tanto no especifica requisitos financieros, contables

o técnicos para la gestión de tipos de activos específicos. ISO 55000 guarda estrecha relación con la gestión del riesgo, por ende, con el Mantenimiento basado en el riesgo RBM (*Capítulo 7*)

Opex (Operational expenditures). es un costo permanente para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema. Puede traducirse como gasto de funcionamiento, gastos operativos, o gastos operacionales.

Sistema de gestión de activos AMS (Assets management System): es un conjunto de elementos interrelacionados o que interactúan para establecer una política de gestión de activos, los objetivos de la gestión de activos y los procesos para lograr dichos objetivos [113].

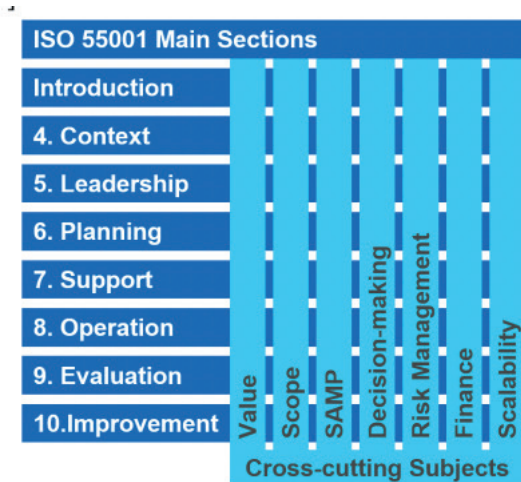
Vida del activo: período transcurrido desde su concepción hasta el final de su vida.

19.2. ¿Cómo opera la Gestión de activos?

La gestión de activos implica que las organizaciones deben alcanzar y manejar una visión holística o integradora de varios enfoques, al momento de gestionar sus activos: financiero, normalización, legislación (regulación), mejores prácticas de mantenimiento, talento humano, nuevas tecnologías.

En la Figura 194, se detallan las principales secciones de la norma ISO 55000 [114], contexto u organización, liderazgo, planeación soporte, operación, evaluación y mejoramiento, las cuales se deben entrecruzar, a fin de crear valor.

Figura 194. Principales secciones de la norma ISO 55000
Tomado de [114]



A continuación, brevemente, se enuncian las secciones de la norma ISO 50000 [114]:

- **Organización:** garantiza que los objetivos de la gestión de activos sean consistentes y estén alineados con los objetivos de la organización, que las partes interesadas estén identificadas y satisfechas, y que se definan el alcance y los límites del AMS.
- **Liderazgo:** garantiza que la dirección general haya implementado el liderazgo en la gestión de activos, que se haya definido y revisado la política de gestión de activos, y que se otorgue al liderazgo de gestión de activos la autoridad, la responsabilidad y los recursos para lograr los objetivos identificados.
- **Planeación:** garantiza que se identifiquen los riesgos y las oportunidades, y que se implementen los planes para abordarlos y respaldar el logro de los objetivos de la organización. Estos planes integrados deben responder qué se hará, cuándo se hará, quién lo hará y cómo se llevará a cabo y se realizará la evaluación. Además, deben responder a los riesgos y las oportunidades y al cambio a lo largo del tiempo, logrando un equilibrio entre el riesgo, el costo y el desempeño.
- **Respaldo:** garantiza que estén disponibles los recursos competentes necesarios para alcanzar los planes, que estén disponibles los sistemas

informáticos para respaldar el proceso, y que se documente, controle y comunique la información y que esta pueda auditarse.

- **Operación:** garantiza que se revisen y controlen los planes, las implementaciones y los procesos, incluida cualquier actividad que se subcontrate, y también que abarque las actividades de gestión de cambio. Es necesario que haya pruebas de que la organización llevó a cabo los planes y los procesos.
- **Evaluación del desempeño:** garantiza que se supervise, mida, analice, evalúe y audite el desempeño de los activos y la eficacia del AMS. La dirección general debe revisar la idoneidad, la pertinencia y la eficacia del AMS.
- **Mejora:** garantiza que se documenten y evalúen las inconformidades o incidentes con respecto a los activos, la gestión de activos o el AMS y se adopten medidas correctivas. La gestión de activos y el AMS deben mejorarse de forma constante.

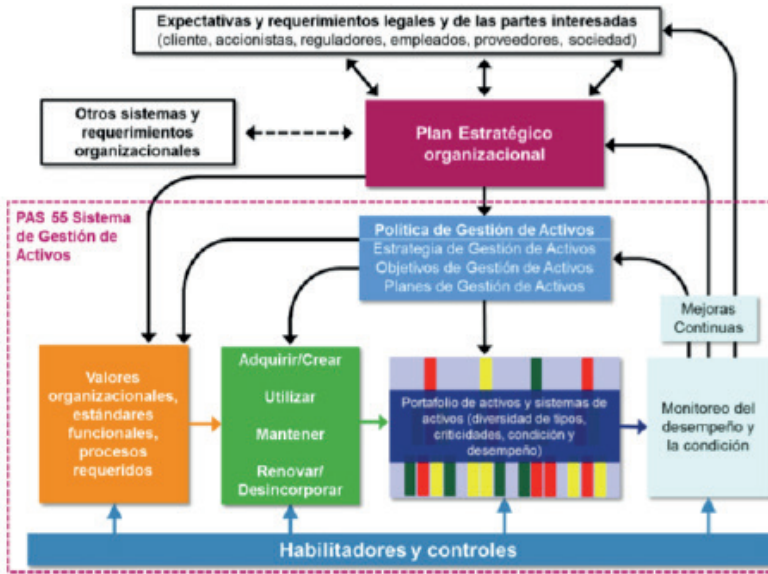
La gestión de activos se aplica en todas las etapas o fases del ciclo de vida del producto, es decir:

- Identificación de necesidades
- Diseño de la solución
- Construcción o fabricación
- Comisionamiento
- Operación y mantenimiento
- Desincorporación o reemplazo

De manera un poco más desglosada, la Gestión de activos se aplica en los siguientes procesos empresariales: planeación, mercadeo, compras, finanzas, gestión de recursos humanos, sistemas integrados de gestión HSEQ (*Quality, Health, Safety & Environment*), mantenimiento, ingeniería, operación (o prestación del servicio)

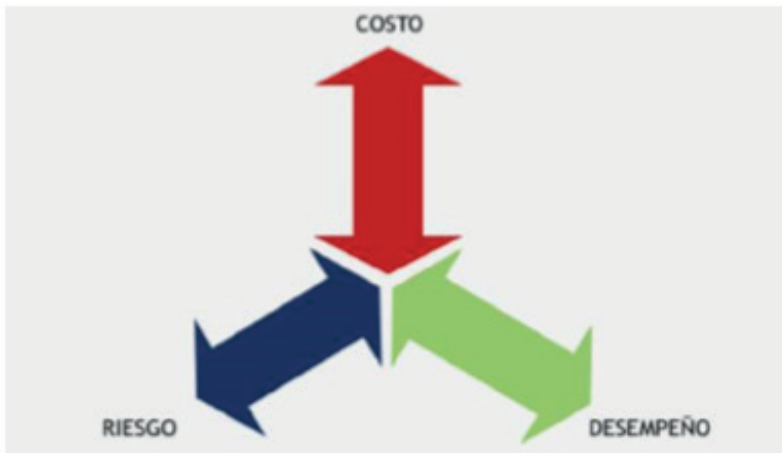
En la Figura 195 se aprecia la estructura general del estándar BSI PAS 55 y tal como se indicó en el *numeral 19.1*, el estándar BSI PAS 55, su enfoque está más orientado a los activos (ver recuadro punteado).

Figura 195. Estructura general del estándar BSI PAS 55 Tomado de [115]



En la Figura 196 se muestran los 3 aspectos más importantes que se deben tener en cuenta en la gestión de activos, es decir, Costos, riesgos y desempeño. De manera global, los costos deben pasar de ser intuitivos a ser justificados; el riesgo se debe evitar y controlar; y el desempeño se debe incrementar al máximo posible, efectuando optimizaciones.

Figura 196. Variables para balancear en la Gestión de activos Tomado de [116]



En la Figura 197 se representa el erróneo devenir financiero y económico de un proyecto, en el cual se pretende que se invertirá dinero en forma de bienes de capital (capex), al inicio del proyecto, y no se utilizará dinero para operaciones (opex), ni habrá sobrecostos.

Figura 197. Expectativa económica y financiera de un proyecto
Tomado de [115]



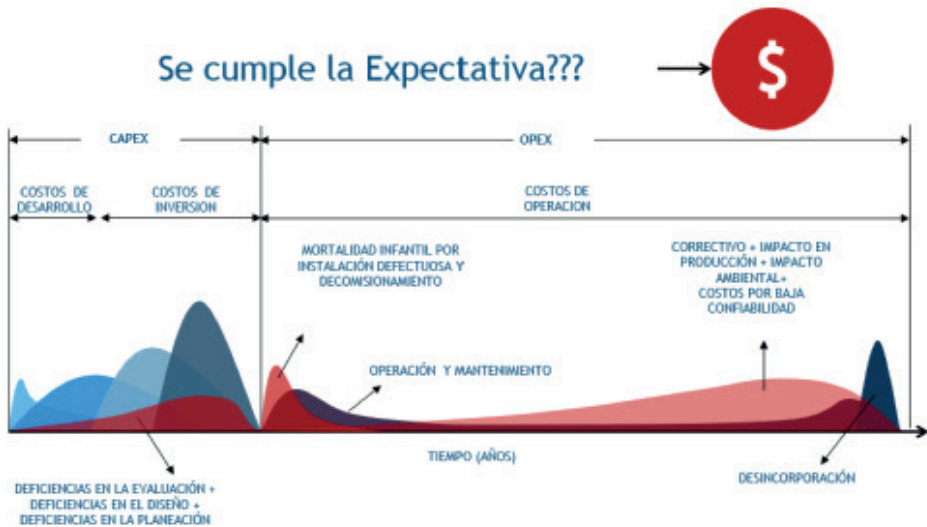
En la Figura 198 se presenta la situación real, en la cual desde el inicio del proyecto aparecen sobrecostos y amenazas por deficiencias en: la evaluación, el diseño y la planeación. Durante la etapa productiva, aparecen sobrecostos y amenazas por: mortalidad infantil de las máquinas y equipos por mala instalación, por la curva de aprendizaje del personal a cargo y por mal comisionamiento; finalizando la vida útil de proyecto y debido a factores de obsolescencia, inadecuación e ineficacia (*ver numeral 1.7*) y a una indebida gestión del mantenimiento, se incrementará el costo rutinario de mantenimiento y por el descenso en la confiabilidad las fallas funcionales impactarán la producción o el servicio; finalmente, aparecen los costos asociados a la baja o desincorporación adecuada de las máquinas/equipos. Es posible que muchos de estos costos no se hayan tenido en cuenta y las expectativas económicas y financieras no se cumplan.

La aplicación de la gestión de activos implica utilizar herramientas tales como los sistemas balanceados de indicadores SBI (en el *Capítulo 12* se trataron algunos de ellos), herramientas financieras y efectuar ejercicios financieros, con el fin de evaluar:

- La efectividad global sobre el activo OEE (*Overall Equipment Effectiveness*)
- El retorno de la inversión sobre el mantenimiento RIMA

- La rotación de activos RA
- Valor económico agregado EVA (*Economic Value Added-Approach*)
- Retorno sobre la Inversión ROI (*Return on Investment*)
- Rentabilidad económica o rentabilidad sobre los activos ROA (*Return on Assets*)
- El retorno sobre el capital empleado ROCE

Figura 198. Expectativa económica y financiera de un proyecto
Tomado de [115]



En la Figura 199 se aprecia la interrelación entre los diferentes indicadores mencionados previamente, y su aporte para calcular el retorno sobre el capital empleado ROCE.

En la Figura 200 gráficamente se aprecian las ventajas económicas de aplicar un enfoque optimizado y proactivo, tal como el que propone la norma ISO 55000. *Grosso modo*, dicho comportamiento se alcanzará aplicando:

- Diseño centrado en la confiabilidad
- Calculando el costo del ciclo de vida
- Inspecciones basadas en riesgo y programas de confiabilidad

- Evaluación y mejoras de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad
- Extensión de la vida útil y análisis de optimización de costos

Figura 199. Relación entre la gestión de activos y el retorno sobre el capital empleado ROCE. Tomado de [115]

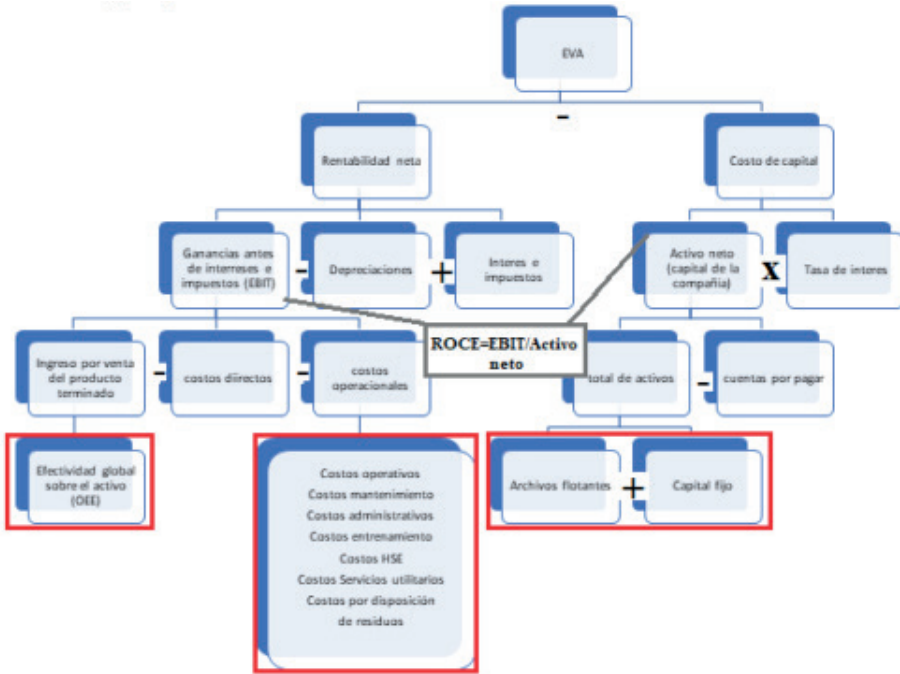
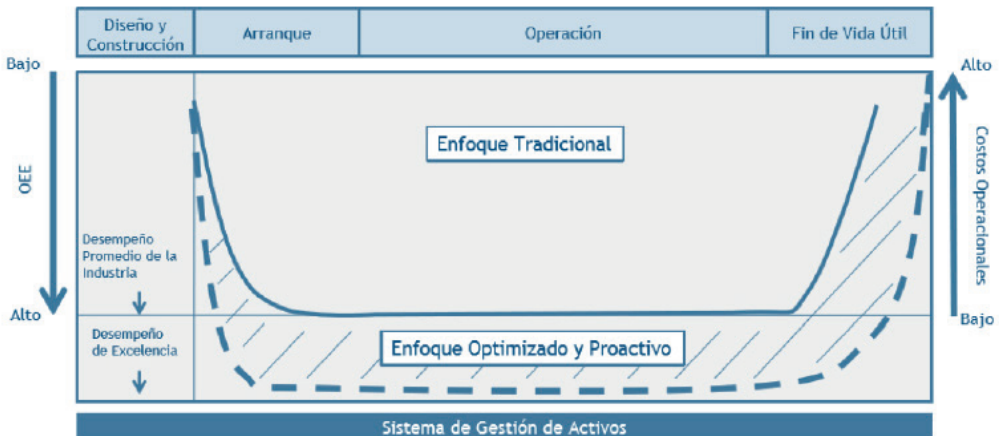


Figura 200. Relación entre la gestión de activos y el retorno sobre el capital empleado ROCE. Tomado de [115]



En la tabla 87 se aprecian algunos rendimientos y beneficios obtenidos al aplicar exitosamente la gestión de activos.

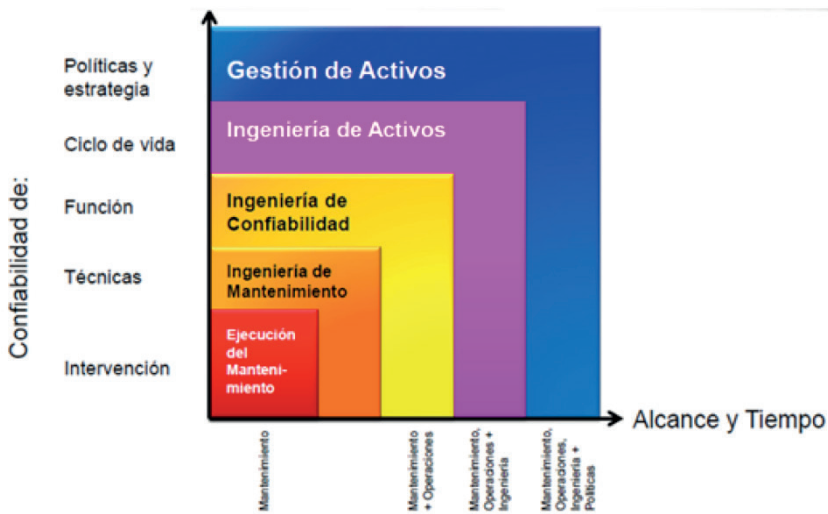
Tabla 87. Referencia numérica de beneficios de la aplicación de la Gestión de activos Tomado de [115]

	Indicador clave de desempeño KPI (<i>Key performance indicator</i>)	Mejor en su clase (<i>best-in-class</i>)	Rezagados (<i>Laggards</i>)
Rentabilidad	ROA (vs. Plan)	+11%	-8%
	Margen operacional (vs. Plan)	+23%	-4%
	Costo de mantenimiento	-8%	+4%
Producción	OEE	90%	60%
	Tiempos de inactividad no planeados (<i>Downtime</i> o TPNP en <i>Capítulo 12</i>)	3%	28%
Seguridad	Índice de frecuencia neta LTIF (<i>Lost Time Injury Frequency Rate</i> (ver fórmula 20, <i>Capítulo 8</i>))	0,18	2,21

19.3. ¿Qué debe hacer Mantenimiento en el enfoque de la norma ISO 55000?

En la Figura 201 se presenta una relación de la evolución de los conceptos asociados a mantenimiento, en función del enfoque aplicado. En el enfoque más básico, mantenimiento está asociado a intervenciones (estrictamente ejecución de mantenimiento), y va evolucionado, hasta considerarse y aplicarse una visión holística entre mantenimiento, operaciones, proyectos y políticas, en la Gestión de activos

Figura 201. Evolución de los conceptos de mantenimiento en Gestión de activos Tomado de [116]

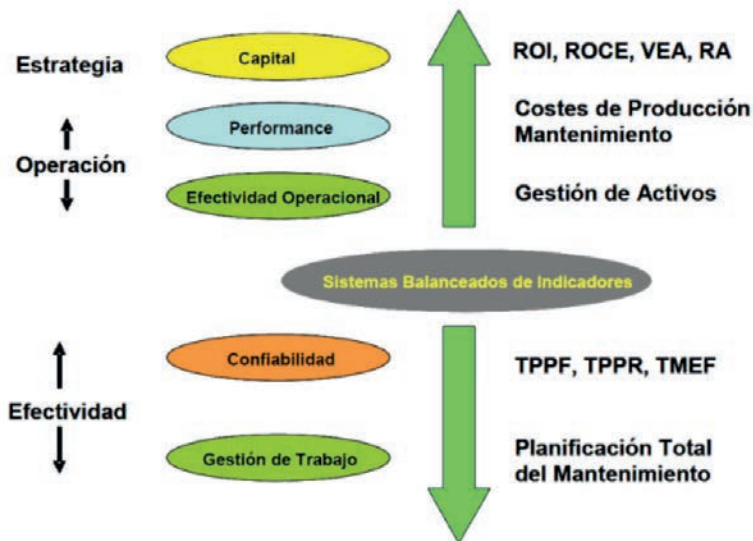


Como se acotó en el *numeral 19.2*, Mantenimiento es un actor clave en el ciclo de Gestión de los activos, no menos importante que cualquiera de los otros, y para ayudar a generar valor debe:

- Ayudar a seleccionar el activo adecuado para el propósito de largo plazo previsto. Deben haber sido concebidos bajo enfoques de diseño para mantenibilidad (recordar modelos de alta disponibilidad *Capítulo 11*)
- Analizar los riesgos de falla del activo
- Planear y programar inspecciones basadas en el riesgo
- Determinar los impactos asociados a la situación de indisponibilidad y determinar el costo de una parada de la operación
- Establecer y aplicar prácticas de clase mundial, (como por ejemplo para la lubricación [117])
- Planear los mantenimientos preventivos, predictivos, de acuerdo con los principios y políticas del Mantenimiento centrados en la confiabilidad RCM (*Capítulo 6*) o Mantenimiento basado en el riesgo RBM (*Capítulo 7*), con la consecuente adquisición de repuestos críticos e instalación de equipos de respaldo (en caso de ser necesarios)

- Asesorar la toma de seguros de daños y lucro cesante apropiados.
- Identificar necesidades de mejora y llevarlas a cabo, con base a metodologías de nivel como los ciclos P H V A (ver numeral 19.4)
- Incorporar sistemas balanceados de indicadores SBI para la medición y evaluación de su gestión, con referentes de clase mundial (Figura 202). Los SBI deben propender al cumplimiento de la Misión, Visión y metas de la organización, y se deben aplicar a todo nivel (gestión operativa, gestión táctica y gestión estratégica)
- Todo lo anterior debe conducir a la Gestión de Mantenimiento, alineada con las prioridades estratégicas de la organización.

Figura 202. Estrategia de los sistemas balanceados de indicadores SBI
Tomado de [118]



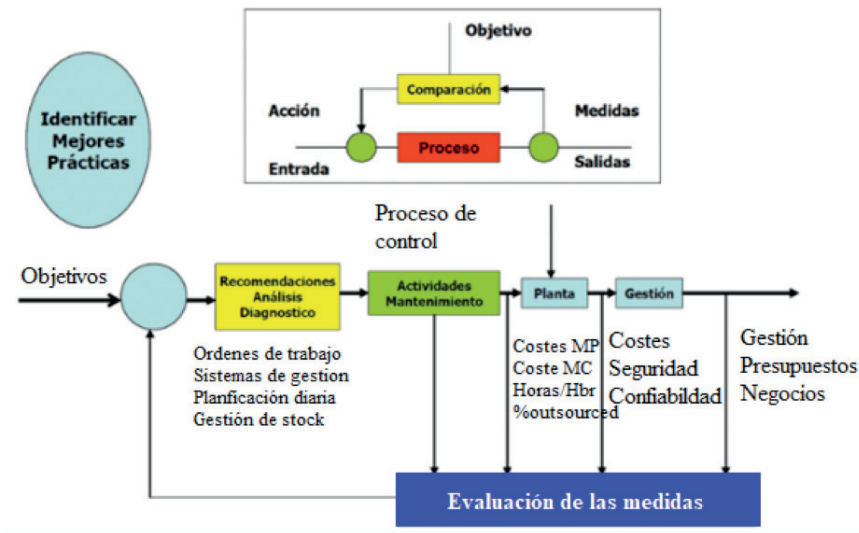
19.4. Ciclos PHVA

El círculo de *Deming* (*Edwards Deming*) o PDCA (*Plan - Do - check - Act*) o Planear, Hacer, Verificar y Actuar PHVA o espiral de mejora continua, es una estrategia de mejora continua de la calidad en cuatro pasos, basada en un concepto ideado por *Walter A. Shewhart*. Es muy utilizado por los sistemas de gestión de la

calidad (SGC) y los sistemas de gestión de la seguridad de la información (SGSI)²

Para el caso de mejoras focalizadas de mantenimiento en el marco de la Gestión de activos, se puede aplicar una variante de los ciclos PHVA como la observada en la Figura 203, la cual está basada en los sistemas de control realimentados o feedback (ver Figura 1 Capítulo 1). A priori, es necesario definir el objetivo que se persigue con una modificación de planta o un *overhaul*; antes de iniciar la labor, el objetivo debe ser traducido a indicadores cuantitativos y cualitativos (en condiciones excepcionales); los indicadores cualitativos (tipo encuesta) permitirán evaluar la percepción del incremento del bienestar del personal, generado por una determinada modificación de planta. Las mediciones se han de hacer antes de iniciar las actividades de mantenimiento y posterior a la ejecución de ellas, nuevamente se harán las mediciones, para evaluar las mejoras en costos, seguridad, confiabilidad.

Figura 203. Proceso de mejoras focalizadas en mantenimiento
Tomado de [118]



19.5. Ventajas de aplicar la gestión de activos

La norma destaca los siguientes beneficios que lograrán las organizaciones al adoptar la norma ISO 55001:

2. Más información en: https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%ADrculo_de_Deming.

- Mejora en el desempeño financiero teniendo en cuenta tanto la visión a corto plazo como a largo plazo.
- Asegurar retorno de inversión de los activos.
- Optimizar uso de la capacidad instalada.
- Controlar riegos de los activos durante todo su ciclo de vida.
- Alargar la vida útil y optimizar los costos de los activos.
- Maximizar el conocimiento de la organización alrededor de sus activos.
- Administración del riesgo para reducir pérdidas y pasivos financieros, lo que mejora la seguridad, la reputación y los impactos ambientales.
- Mejora de servicios y resultados debidos a un mejor desempeño de los activos.
- Responsabilidad social demostrada en relación con los impactos ambientales y sociales.
- Cumplimiento demostrado de los requisitos legales, estatutarios y regulatorios.
- Optimización de la reputación a través de la mejora de la satisfacción del cliente y de la confianza de las partes interesadas.
- Mejora de la sustentabilidad organizacional, gestionando eficazmente los efectos a corto y largo plazo.
- Mejora en la eficacia y eficiencia al incrementar la capacidad de la organización para alcanzar sus objetivos.

CAPÍTULO VEINTE

Auditoría de un departamento de Mantenimiento

En el presente capítulo se presentan los lineamientos generales acerca del procedimiento para efectuar una auditoría a la gestión de un departamento de mantenimiento. Eventualmente es necesario desarrollar este tipo de auditorías, y conviene contar un derrotero mínimo, para tal propósito.

Una auditoría de mantenimiento es una actividad que puede ejecutarse con el objetivo de:

- Efectuar una autoevaluación de mi gestión como gerente/jefe de mantenimiento
- Evaluar la administración del mantenimiento que esté desarrollando un cierto gerente / jefe de mantenimiento
- Elaborar un primer diagnóstico de la función mantenimiento, con el ánimo de emprender un proceso de certificación de calidad
- Evaluar los avances, luego de haber emprendido una reorganización o reingeniería de la función mantenimiento en una determinada organización
- Elaborar un primer diagnóstico de la función mantenimiento, bien sea para un proceso de compra o fusión de compañías, o una vez que haya sido adquirida
- Preparar la visita de un directivo importante, para el caso de multinacionales con procesos no muy estandarizados

20.1. Procedimiento general

20.1.1. Preparación de la auditoría

- Definir claramente si se trata de una empresa de fabricación o de prestación de servicios
- Profundizar en el conocimiento de los procesos de fabricación o servicio que desarrolle la empresa

- Hasta donde sea posible, acopiar, leer y analizarla información que pueda ser enviada por el interesado. Esta información puede consistir en: organigrama de la empresa, organigrama del departamento de mantenimiento, distribución de la planta o empresa, inventario de máquinas o equipos, información del software de mantenimiento utilizado.
- En función del tamaño de la empresa y del análisis hecho de la información previamente allegada, estimar la cantidad de tiempo (días u horas) requerido para la auditoría y la cantidad de personal que la ejecutará. Se debe elaborar un cronograma de la visita, el cual con la suficiente antelación debe ser enviado a los interesados.
- Preparar un derrotero con las preguntas tipo, acordes al cronograma previamente establecido.

El procedimiento descrito a continuación se puede aplicar de manera genérica tanto a una planta de producción, como a una empresa de servicio, teniendo en cuenta con las debidas particularidades; esencialmente en una empresa de servicios no se dispondrán máquinas y los clientes intermedios serán pocos, atendiéndose casi que directamente al cliente final.

20.1.2. Visita de campo

Recorrido general por la planta de producción, con el objetivo de identificar de primera mano:

- Evidencia de que el mantenimiento está siendo bien ejecutado: estado de anclajes, existencia de ruidos y vibraciones anormales, estado de limpieza de la maquinaria, fugas, derrames en piso, escapes (vapor, aire comprimido, refrigerantes, etc.), estado de conducciones y tableros eléctricos, válvulas de sistemas de fluidos, herramientas o equipos de apoyo abandonados debidamente dispuestos, reparaciones visiblemente defectuosas, arreglos improvisados, ambiente laboral, residuos peligrosos indebidamente dispuestos o almacenados, etc.
- Evidencia de una adecuada cultura de seguridad industrial y salud ocupacional: demarcación, señalización, uso de la indumentaria adecuada, uso de los elementos de protección personal EPP (inexistentes, incompletos, defectuosos), condiciones inseguras, actos inseguros, trámite de permisos de trabajo y/o listas de chequeo, candados de bloqueo, tarjetas de advertencia de bloqueo, sistemas de contingencia (por ejemplo, sistemas de control de incendios), salidas de emergencia, etc.

- Estado general de la planta física de producción: estructura, paredes y su pintura, techos, iluminación, ventilación, etc.
- Evidencia preliminar de un adecuado control de la producción: derrames de producto intermedio o terminado, personal ocioso, personal estresado, productos indebidamente almacenados o apilados, ambiente laboral, identificar reprocesos (en caso de ser posible), etc.

Recorrido general por las locaciones relacionadas con los servicios para la planta de producción (subestación eléctrica, planta eléctrica de respaldo, tanque de combustible, equipos generadores de aire, sistemas de enfriamiento, etc.), con el objetivo de identificar de primera mano:

- Estado de los equipos respectivos (ver *numeral 20.1.1*)
- Estado de las instalaciones que albergan los equipos (ver *numeral 20.1.1*)
- Estado de los sistemas de conducción hasta la planta de producción: estado aparente de tuberías y conducciones (pintura, óxido, herrumbre), niveles y/o desniveles adecuados, soportería, sistemas de purgado, equipos contra incendios, etc.

20.1.3. Visitas al departamento de mantenimiento

Entrevista con el Gerente/jefe, indagando, observando evidencias y dialogando acerca de:

Las políticas de mantenimiento empleadas, organigrama del departamento y sus perfiles de cargos (incluyendo los practicantes), información de las máquinas/equipos (manuales, catálogos, especificaciones técnicas, normas, planos, literatura, documentación diversa), codificación de máquinas/equipos atada a centros de costo, manejo de reportes de fallas, programación de las tareas de mantenimiento, cuantificación del trabajo represado o backlog, procedimientos de inspección y de detección de fallas, existencia, utilización y evaluación de indicadores (de eficacia, administración y costos), rutinas de mantenimiento en la planta, plan de manejo de productos RESPEL, procesos de compra de tangibles y servicios, subcontratación de servicios, gestión del planeador de mantenimiento (manejo de las OT), software de mantenimiento (potencialidades y utilización de las mismas), plan de capacitación al personal, control del presupuesto de mantenimiento

Visita al taller de mantenimiento, indagación y observación acerca de:

Tipo de tareas que se desarrollan en el taller, personal que atiende las tareas de taller, herramientas y equipos de apoyo (pertinencia, cantidad, estado), mesas de trabajo, equipos de elevación y movimiento, máquinas-herramienta, sitio adecuado para el almacenamiento temporal de productos RESPEL, almacenamiento de equipos que no están utilizando o han sido dados de baja, locaciones para contratistas.

Visita al almacén de mantenimiento, indagando, observando evidencias y dialogando acerca de:

Identificación de si se trata de almacén centralizado o descentralizado (sub-almacenes), estado la instalación física, calidad del almacenamiento, procesos de entrega de productos a los usuarios, control del inventario, estadísticas de consumo, estadísticas de rotación de inventarios, valoración de la necesidad de la existencia de sub-almacenes (*ver Capítulo 16*).

20.1.4. Visita al departamento de Compras/división financiera

Verificación de codificación de repuestos, políticas de pedido de materiales, causación contable adecuada, tiempos de respuesta, cualificación de los proveedores, certificación de proveedores, estabilidad en el costo mensual de mantenimiento (en relación con unidades producidas, horas laboradas, distancias recorridas, servicios prestados, etc.).

20.1.5. Recursos humanos

Indagación acerca de las tasas de accidentalidad, factores de ausentismo, rotación del personal de mantenimiento (por despidos y retiros voluntarios), ambiente laboral, plan de capacitación del personal.

En caso de no contar con un plan de capacitación, se puede sugerir que el Gerente/jefe de mantenimiento, con el acompañamiento de un funcionario de recursos humanos, respondan la siguiente serie de preguntas, que darán luces sobre las necesidades de capacitación:

- a. Una vez ocurrida una falla ¿el diagnóstico es rápido y certero? (No o casi nunca, algunas veces, muchas veces, todo el tiempo)
- b. ¿La calidad de los trabajos de mantenimiento/aseo/sanidad (para los equipos de interés) y el nivel de satisfacción de los usuarios (internos/externos) son buenos? (No o casi nunca, algunas veces, muchas veces, todo el tiempo)

- c. ¿Solo alguna/as personas del departamento de mantenimiento lo saben todo? (Sí, ¿cuántos y quiénes?, No, ...)
- d. ¿Todas las personas del departamento de mantenimiento saben “algo”? (Sí, ¿cuántos y quiénes?, No, ...)
- e. ¿Para las mismas tareas, los niveles de rendimiento de diversos ejecutantes son diferentes? (Sí, ¿cuántos y quiénes?, No, ...)
- f. ¿Se asimilan bien los cambios tecnológicos? (No o casi nunca, algunas veces, muchas veces, todo el tiempo)

Si las respuestas son: **a)** NO, **b)** NO, **c)** Sí, **d)** NO, **e)** Sí y **f)** NO, es indicativo de que se requiere capacitación del personal de mantenimiento, en una o varias de las siguientes áreas:

- e. Conocimiento general del mantenimiento
- f. Conocimiento estratégico del mantenimiento
- g. Conocimiento del oficio del mantenimiento
- h. Conocimiento del oficio del mantenimiento, en campos específicos (por ejemplo, Instalaciones y equipos de gas, lubricación, refrigeración y aire acondicionado, etc.)

Una vez ejecutado el ejercicio anterior, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda incluir lo propio en el Plan de Capacitaciones anual pertinente.

20.2. Informe de la auditoría de mantenimiento

La estructura de presentación del informe depende del objetivo que se esté persiguiendo al ejecutar la auditoría.

20.2.1. Caso 1

Si se trata de una auditoría con los objetivos **c)**, **e)** y **f)** planteados al inicio del presente capítulo, se podría presumir que la planta/empresa de servicios no cuenta con referentes, patrones, indicadores o estándares previos, por lo tanto, las observaciones y análisis de la auditoría se tomarán como punto de partida o estado inicial, y se plantearán planes de mejora, con recomendaciones en cuanto a:

- Adquisición, implementación o potenciación del uso de software de mantenimiento
- Contratación de personal administrativo y operativo (*ver Capítulo 15*)
- Contratación externa de servicios (*ver Capítulo 17*)
- Definición de un plan de capacitación de personal
- Impulso a la gestión del mantenimiento, en cuanto a calidad de la información de las máquinas/equipos, programación de las tareas y estimación del *backlog* (*ver Capítulo 13*), elaboración de indicadores y manejo de estadísticas (*ver Capítulo 12*), Mejora de la gestión del almacén de mantenimiento (*ver Capítulo 16*), elaboración de presupuestos (*ver Capítulo 18*), principalmente.
- Mejora de la cultura de seguridad industrial y en la gestión de RESPEL (*ver Capítulo 8*)
- Establecimiento o mejora de espacios físicos para actividades de mantenimiento de reparación o alistamiento
- Mejoras en los procesos de compra de tangibles y servicios, atados a la codificación y causación contable adecuada

La estructura genérica del informe de auditoría puede ser la siguiente:

- Preliminares
- Información general de la empresa
- Informe de los hallazgos y apreciaciones de las visitas de campo
- Informe de las observaciones y hallazgos producto de las entrevistas con el departamento de mantenimiento, departamento de compras/financiera y recursos humanos.
- Propuestas de mejora y recomendaciones
- Conclusiones

20.2.2. Caso 2

Si se trata de una auditoría con los objetivos **a)** y **d)** planteados al inicio del

presente capítulo, se podría presumir que la planta/empresa de servicios sí cuenta con referentes, patrones, indicadores o estándares previos.

En este caso las observaciones y análisis de la auditoría se deberán ser contrastadas con las informaciones (referentes) allegadas por parte de la empresa. Podría haber aspectos en los cuales se muestren avances, en otros aspectos conservación del estado, y en otros retrocesos, caso en el cual la auditoría planteará recomendaciones. La validez de las recomendaciones que efectúe la auditoría dependerá de la veracidad de las informaciones entregadas como referentes.

La estructura del informe corresponderá esencialmente a la propuesta en el Caso 1, adicionado un apartado de *Comparación de la gestión actual versus los referentes* (ubicado entre el Informe de las observaciones y hallazgos producto de las entrevistas con el departamento de mantenimiento, departamento de compras/financiera y recursos humanos y Propuestas de mejora y recomendaciones).

20.2.3. Caso 3

Si se trata de una auditoría con el objetivo **b)** planteado al inicio del presente capítulo, la estructura del informe dependerá de si se cuenta o no con referentes, por lo tanto, el informe se corresponderá con el Caso 1 o el Caso 2, así como la estructura del respectivo informe.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Herrera S., Humberto. 2006. *Mantenimiento Industrial*. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [2] Pérez, Carlos. M. 1992. *Gerencia de Mantenimiento y sistemas de información*. Memorias para cursos dictados con la asociación de Ingenieros Mecánicos y UPB. Medellín.
- [3] Montilla, Carlos A. 2015. *Notas de clase curso Mantenimiento Industrial*. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [4] Eral S. A. Clarificadores – Espesadores. Consultado el 03/08/2009. Disponible en: <http://www.eralgroup.com/pages/washing.php>.
- [5] Cerón, Ángela María. Charry, Germán Adolfo. Coronado, Jhon Jairo. Análisis de falla del eje de un agitador para tratamiento de agua. Revista *Scientia et Technica* Año XII, No 30, Mayo de 2006 Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-170.
- [6] Monchy, Francois. 1990. *Teoría y prácticas del mantenimiento Industrial*. Barcelona. Editorial Masson.
- [7] Smith, Anthony R. Hinchcliff, Glenn R. 1991. *RCM - Gateway to world class maintenance*. Burlington, USA. Editorial Elsevier Butterworth-heinemann.
- [8] Valie, Claude. 2008. *Mantenimiento y Producción dentro del Lean Manufacturing*. Bogotá. Congreso internacional de Mantenimiento ACIEM.
- [9] HSB Global Standards Reliability Technologies. Consultado en marzo 2006. Disponible en: www.bitpipe.com
- [10] Montilla, Carlos A. Zuluaga, Yohana. Parra, Santiago. 2009. “Determinación de las estrategias de mantenimiento utilizadas por las grandes y medianas empresas del área metropolitana Pereira – Dosquebradas”. *Revista Scientia et Technica* Año XV, No 41, Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701, pp 357-362.
- [11] Asociación Colombiana de Ingenieros ACIEM. 2009. “Estudio estado del arte, Mantenimiento en Colombia 2008”. Bogotá, En http://www.aciem.org/home/Pdfs/Consulta_Comisiones/Estado_del_Arte_Mantenimiento_Col_2008.pdf.
- [12] Espinoza, Julio. Un enfoque de Mantenimiento. Revista Mantenimiento N°1, AÑO 1990 - ISS 0716-8616.
- [13] Tomado de TPM club India, disponible en: <http://www.tpmclubindia.org/pdf/TPM-Awards-India.pdf>
- [14] TPM Club India. Disponible en:

http://jipm.or.jp/en/activity/pm/2018/pdf/190129_01.pdf

- [15] TPM Club India. Disponible en: http://jipm.or.jp/en/data/140128_1.pdf
- [16] “Economía de Colombia”. Consultado en junio de 2014. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Econom%C3%ADa_de_Colombia.
- [17] Corporación para el desarrollo de las microempresas. Observatorio colombiano de las microempresas OCM. Bogotá, abril de 2007. “Estadísticas de la microempresa en Colombia, análisis comparativo 1990 – 2005”.
- [18] Departamento administrativo nacional de Estadística DANE. Censo general, año 2005.
- [19] Revista Dinero. Mipymes generan alrededor del 67% del empleo en Colombia. Disponible en:
<https://www.dinero.com/edicion-impresa/pymes/articulo/evolucion-y-situacion-actual-de-las-mipymes-en-colombia/222395>
- [20] Arroyave M., Javier. 2009. Desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo para la planta de secado de la Cooperativa de Caficultores de Manizales. Universidad Tecnológica de Pereira. Trabajo de grado.
- [21] Compresores de pistón/ portátiles. Consultado en junio de 2010. Disponible en: http://agfri.com/index.php?main_page=product_info&cPath=5_19&products_id=114
- [22] Compresores de pistón estacionarios. Consultado en junio de 2010. *Directindustry*. Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/atlas-copco-compresseurs/compresores-piston-sin-aceite-estacionarios-8358-234495.html>
- [23] *McNeilus*. Departamento de Automatización y Mantenimiento de Plantas. Kelly, Carlos. 2002.
- [24] Software de Mantenimiento *MPSoftware*. Versión demo.
- [25] Restrepo M., Julián. 2005. Pereira. Nicholas M. Sebastián. Programa básico de mantenimiento preventivo para la celda de manufactura flexible de la Facultad de Ingeniería Industrial. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [26] Ríos G., Alexander. Carvajal G., Guillermo. 2008. Desarrollo de una aplicación computacional para la implementación de programas de mantenimiento preventivo. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [27] Sanabria M., José. López V., Juan. 2009. Pereira. Desarrollo de un software de administración de mantenimiento preventivo para los elementos mecánicos del sistema cable aéreo Manizales de la empresa Ingecable S. A. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.

- [28] Gaviria R., Álvaro. Rivera V., Juan. 2011. Pereira. Diseño y sistematización en Excel del plan de mantenimiento preventivo para la sección de tanques de gasolina de la planta Suzuki motor de Colombia S. A. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [29] **Ávila, C., Jaime.** Gutiérrez F., Sebastián. Elaboración y sistematización de un plan de mantenimiento preventivo para la planta de producción de la empresa Flexco S. A. 2011. Pereira. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [30] Santamaría H., Ricardo. Guzmán L., Hugo. 2008. Bogotá. La Integralidad del predictivo como herramienta para el mantenimiento. Tecnología avanzada para el mantenimiento S. A. de C.V. Queretaro - México. Taller presentado en el X Congreso Internacional de Mantenimiento ACIEM 2008, pág. 76 a 82.
- [31] “El espectro visible”. Consultado en junio de 2014. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_visible.
- [32] “Detección de partículas con bolómetros centelleantes. Consultado en junio de 2014. El experimento de Rosebud”. Disponible en: <http://www.unizar.es/lfnae/rosebud/paginas/p0300.html>.
- [33] “Asesoría profesional en inspección. Ensayo de tintas penetrantes”. Disponible en: http://endases.mex.tl/frameset.php?url=/photo_26975_L-QUIDOS-PENETRANTES.html. Consultado en 2014.
- [34] Carvajal M., Jhon E. 2012. Pereira. Elaboración de guías para prácticas básicas de mantenimiento predictivo (cámara termográfica, detector de discontinuidades por ultrasonido y tintas penetrantes). Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [35] Gaviria, Alonso. 2009. Pereira. Memorias de Seminario de Mantenimiento Predictivo: Medición y Análisis de vibraciones, Alineación de Maquinaria, Balanceo y Análisis Termográfico. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [36] Update international. Manual de alineamiento de maquinaria.
- [37] Quintero R., Héctor. 2014. Pereira. Notas de clase curso de Vibraciones Mecánicas. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [38] Tabares D., Juan S. 2012. Pereira. Elaboración de guías para prácticas básicas de mantenimiento predictivo (análisis de vibraciones, alineamiento de maquinaria y nivel de ruido). Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [39] Ensayo de ultrasonido en soldadura. Consultado en marzo de 2019. Disponible en: <https://www.qaqc-inspeccion.com.pe/es/service/inspeccion-con-ultrasonido>
- [40] Where to sample. Diesel engine. Consultado em 2016. Disponible en: <http://www.maintenanceresources.com/referencelibrary/oilanalysis/oa-moa-d.htm>

- [41] Widman International SRL El Desgaste del Motor – Cuanto es Normal. Consultado en 2016. Disponible en: <http://widman.biz/boletines/28.html>
- [42] Kagermann. H, Wolf-Dieter. L, Wahlster W. “*Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*” (Online). Disponible en: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/produktion/industrie-40-mit-internet-dinge-weg-4-industriellen-revolution/>
- [43] Fernández, Javier. La industria 4.0: Una revisión de la literatura (2017) Disponible en: <http://fundacioniai.org/actas/Actas3/Actas3.25.pdf>
- [44] Liu, Yongkui. Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis. 2016. Disponible en:
[http://asmedigitalcollection.asme.org.ezproxy.utp.edu.co/article.aspx?articleid=2553191&resultClick=1\[1\]](http://asmedigitalcollection.asme.org.ezproxy.utp.edu.co/article.aspx?articleid=2553191&resultClick=1[1])
- [45] Boston Consulting Group: Industry 4.0 to lift manufacturing to new levels. Disponible en: <https://www.consultancy.uk/news/2099/bcg-industry-40-to-lift-manufacturing-to-new-levels>
- [46] ITU, Internet Reports 2005: The internet of things. Consultado en julio 2019. Disponible en: <https://www.itu.int/osg/spu/publications/internetofthings/>
- [47] 17 de mayo Día de Internet. Pero... ¿qué sabes del Internet de las cosas? Consultado en julio de 2019. Disponible en: <http://creativiamarketing.com/17-mayo-dia-internet-sabes-del-internet-las-cosas/>
- [48] Peng, Y. Dong, M. Zuo, M. J. “*Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review*” DOI: 10.1016/j.crip/2015.06.004
- [49] H.J. Hwanga, J.H. Leeb, J.S. Hwangc, H.B. Jun. “*A study of the development of a condition-based maintenance system for an LNG FPSO*” Sep 2018, *Ocean Engineering*. DOI:10.1016/j.oceaneng.2018.07.004
- [50] Mantenimiento Basado en la Condición. Consultado en julio de 2019. Tomado de: <https://www.scnsoft.com/blog/iot-predictivemaintenance-guide>
- [52] “Automatización de la manufactura. Elementos de un sistema de manufactura”. Disponible en: <http://manufacturabustos.blogspot.com/>. Consultado en junio de 2014
- [53] “Electro-industria. Mantenimiento productivo total TPM”. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1520>. Consultado en junio de 2014.
- [54] Velásquez G., Jhon F. 2011. Pereira. Diseño e implementación de un programa de lubricación para las plantas 4 y 5 de Buencafé liofilizado de Colombia, bajo el enfoque de TPM. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.

- [55] Ospina P., Diego. 2011. Pereira. Diseño de estándares de mantenimiento para la empresa *Meals de Colombia S. A.* Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [56] Moubray, John. 1991. *Reliability-Centered Maintenance*. Oxford, England. Butterworth-Heinemann Ltd.
- [57] Nowlan, Stanley. Heap, Howard. 1978. *Reliability Centered Maintenance*. San Francisco California. Braun-Brumfield, Inc.
- [58] Agencia Nacional Aeroespacial NASA de E.E. U.U. National aeronautics and space administration reliability centered maintenance guide for facilities and collateral equipment. February 2000. Disponible en: <https://www.youtube.com/>
- [59] Kardec, Alan. Nascif, Julio. 2002. Mantenimiento: Función estratégica. Rio de Janeiro. Qualitymark Editora Ltda.
- [60] Duque R., Didier. Chilito Q., Juan M. Desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo para los talleres de Chevrolet caminos, con sedes en las ciudades de Armenia, Cartago y Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Trabajo de grado. 2011.
- [61] Silva M., Carlos E. 2007. Pereira. Diseño de un sistema de mantenimiento para equipos móviles de transporte de carga terrestre. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [62] Da Costa B., Martin. 2008. Bogotá. Aplicación de la metodología RCM en los equipos de criticidad A, para la actualización de los planes de mantenimiento de la refinería de zinc Votorantim metáis – Unidad Cajamarquilla Perú. Congreso internacional de Mantenimiento ACIEM.
- [63] “Alaska sufre el Exxon Valdez 25 años después. Ecoportal-net” Consultado en junio de 2014. Disponible en: http://www.ecoportal.net/Eco-Noticias/Alaska_sufre_el_Exxon_Valdez_25_anos_despues.
- [64] “Desastre del Exxon Valdez”. Consultado en junio de 2014. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Desastre_del_Exxon_Valdez.
- [65] “Gestión de calidad y el accidente en Bhopal, India”. Consultado en junio de 2014. Disponible en: <http://qualitydigestespanol.blogspot.com/2011/02/gestion-de-calidad-y-el-accidente-en.html>.
- [66] “Desastres del siglo XX. Desastre de Bhopal”. Consultado en junio de 2014. Disponible en: <http://desastresdelsigloxx.blogspot.com/2012/06/desastre-de-bhopal-1984.html>.
- [67] “Desastres del siglo XX. Accidente de Chernóbyl (Ucrania)”. Disponible en: <http://desastresdelsigloxx.blogspot.com/2012/06/accidente-de-chernobil-ucrania-de-1986.html>. Consultado en junio de 2014.

- [68] BBC Mundo. “El superdomo que pondrá punto final a Chernobyl”. En:http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150323_chernobyl_domo_sem_lp. Consultado en agosto 13 de 2015.
- [69] Espinosa F, Fernando. “Charlas para la gestión del mantenimiento: Mantenimiento basado en el riesgo”. Disponible en: http://www.academia.edu/6336664/Charlas_para_la_gesti%C3%B3n_del_mantenimiento. Consultado en junio de 2014.
- [70] Valencia, Andrés F. 2010. Popayán. Sistemas instrumentados de seguridad. International Society of Automation ISA, Colombia Section. VI Seminario de Automática, tendencias científicas y tecnológicas. Universidad del Cauca.
- [71] Montilla C.A. 2009. Notas de clase curso Instrumentación y control. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [72] MINISTERIO DE TRABAJO RESOLUCIÓN 1409 (julio 23 de 2012) por la cual se establece el Reglamento de Seguridad para protección contra caídas en trabajo en alturas.
- [73] Trabajos en alturas NOM-009 STPS 2011. Consultado en 2019. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/12628368/>
- [74] Lista de chequeo en alturas. Consultado en 2019. Disponible en: Cortesía de <https://www.sst-safework.com/2019/02/13/lista-de-chequeo-en-alturas/>
- [75] Molu Chile. Consultado en julio de 2019. Disponible en <http://molu.cl/barreras.html>
- [76] Dispositivos para bloqueo eléctrico. Consultado en julio de 2019. Disponible en: <http://www.melcsa.com/marcas/seguridad-industrial/brady/bloqueo-electrico>
- [77] Candados y tarjetas de bloqueo. Consultado en julio de 2019. Disponible en:
http://www.paritarios.cl/prevencion_de_riesgo_Instructivo_de_Trabajo_Uso_de_Tarjetas_de_Bloqueo.html), y <http://www.melcsa.com/marcas/seguridad-industrial/brady/bloqueo-electrico>
- [78] Tarjeta de advertencia y candado de bloqueo. Consultado en julio de 2019. Disponible en:
http://www.paritarios.cl/prevencion_de_riesgo_Instructivo_de_Trabajo_Uso_de_Tarjetas_de_Bloqueo.html y <http://www.melcsa.com/marcas/seguridad-industrial/brady/bloqueo-electrico>
- [79] Candados de seguridad. Consultado en julio de 2019. Disponible en <https://mx.all.biz/portacandados-de-seguridad-g18012>
- [80] Accidentes de trabajo en Colombia en cifras. Consultado en julio de 2019. Disponi-

- ble en: <https://safetya.co/accidentes-de-trabajo-en-colombia-en-cifras-2018/>
- [81] Residuos peligrosos. Consultado en julio de 2019. Disponible en: <http://www.plane-taazul.com.mx/site/2012/03/21/residuos-peligrosos/>)
- [82] Gema pro. Bodegas para residuos peligrosos. Consultado en julio de 2019. Disponible en: <http://www.gemapro.cl/producto/bodega-residuos-peligrosos-brp-3-12-tambores/>)
- [83] Mesa G., Dairo H. Notas de clase curso Tribología. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, 2014
- [84] Técnica motor. Curva de Stribeck. Consultado en 2016. Disponible en: <https://tecnicamotor.wordpress.com/2016/10/19/tribologia-lubricacion-hidrodinamica/>
- [85] Aceites sintéticos versus minerales. Consultado en 2016. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos10/lubri/lubri.shtml>
- [86] Índice de viscosidade mineral versus sintético. El rincón del lubricante. Consultado en 2016. Disponible en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/32854/1/pale-bacilio.pdf>
- [87] Lubricantes BP. Consultado em 2016. Disponible en: <http://www.bplubricants.com/es/products/visco-7000-5w-30>
- [88] Widman International SRL. Mantenimiento Proactivo. Normas SAEJ300. Consultado en 2016. Disponible en: <https://www.widman.biz/Seleccion/j300.html>
- [89] Widman International SRL. Mantenimiento Proactivo. Consultado en 2016. Disponible en: <http://widman.biz/Seleccion/j300.html>
- [90] Widman International SRL. Mantenimiento Proactivo. Consultado en 2016. Disponible en: <http://widman.biz/Seleccion/j306.html>
- [91] Mantenimiento LA. ¿Sabes interpretar el símbolo de servicio de API? Consultado em 2016. Disponible en: <http://maintenancela.blogspot.com/2013/12/sabes-interpretar-el-simbolo-de.html>
- [92] Widman International SRL. Mantenimiento Proactivo. Consultado en 2016. Disponible en: <http://www.widman.biz/boletines/2.html>
- [93] Widman International SRL. Mantenimiento Proactivo. Disponible en: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/0609ViscosidadWidman.pdf>. Consultado en 2016.
- [94] Widman International SRL. Mantenimiento Proactivo. Consultado en 2016. Disponible en: <http://www.widman.biz/boletines/10.html>
- [95] Motor Vehicle Brake Fluid J1703_201208. Consultado en 2016. Disponible en: ht-

[tps://www.sae.org/standards/content/j1703_201208/](https://www.sae.org/standards/content/j1703_201208/)

- [96] Servicio Nacional de aprendizaje SENA. Curso de mantenimiento preventivo. Consultado en 2016. Disponible en: http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21_1/alephe/www_f_spa/icon/15067/vol12/volumen12.html#.
- [97] Sistemas de lubricación automática. Consultado en 2016. Disponible en: http://multitac.net/lubricacion_automatic.htm
- [98] Lubricación por baño de niebla. Consultado en 2016. Disponible en: <http://www.rivi.es/sistemas/niebla.php>
- [99] Duffuaa, Salih. Raouf, A. Dixon, John. 2005. Sistemas de mantenimiento, planeación y control. México D. C. Editorial Limusa Wiley. Primera edición.
- [100] Isaza V., Luis. 2005. Pereira. Manual para la implementación de un departamento de Mantenimiento basado en la filosofía del Mantenimiento Productivo Total y a norma ISO 2001. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [101] “Análisis y diagramas de Pareto”. Consultado en junio de 2010. Disponible en: <http://www.slideshare.net/jeffertyni/anlisis-y-diagramas-de-pareto>.
- [102] Jiménez S., Luis Miguel. Nuevas tecnologías para la aplicación del mantenimiento. Empresa Colombiana de petróleos. 1996.
- [103] Bombas aspirante-impelente. Consultado en 2016. Disponible en: http://www.rit-modominicano.com/wiki.php?title=Bomba_de_varilla
- [104] Benoit, E. Luis. Elmann, Suerio y asociados. “Lo que más nos debería preocupar del mantenimiento”. Consultado en junio de 2010. Disponible en: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/preocupar.pdf>.
- [105] Microsoft Project Standard. Software para planeación de proyectos. García G. Universidad Tecnológica de Pereira. 2012.
- [106] Elba Mexicana S. A. de C.V. Scraper radial RS8NE. Listado de repuestos.
- [107] Ingeniería de mantenimiento. Manual práctico para la gestión de mantenimiento industrial. Autor: Santiago García Garrido. Volumen I. Año 2012. 600 páginas.
- [108] Ardila, M., Martínez, W. & Olmos, L. (2015). Outsourcing de mantenimiento, una alternativa de gestión de activos en el sector productivo de bienes y servicios. Cuaderno Activa, 7, 123-133],
- [109] García, Anselmo. Mertnes, Leonard. Wilde, Roberto. Procesos de subcontratación y cambios en la calificación de los trabajadores. Estudios de caso en México.
- [110] Guitart Tarrés, Laura. La ruptura de la cadena de valor como consecuencia de la subcontratación. De la subcontratación tácticas a la estratégica. Una investigación cua-

litativa mediante el análisis de casos. Universidad de Barcelona. 2005

- [111] Mantenimiento y Confiabilidad. Consultado en julio de 2019. Disponible en: <https://www.slideshare.net/joseo/tema-3-mantenimiento-y-confiabilidad/6>
- [112] ISO/TC 251. Asset Management. Disponible en: <https://committee.iso.org/sites/tc251/social-links/resources/espanol.html>
- [113] Copperleaf Technologies. Una práctica recomendada de la norma ISO 55000: planeación y gestión de inversión de activos. 2018
- [114] Norma ISO 55000. Gestión de activos: información general, principios y terminología
- [115] Duarte, Juan Carlos. AMS Group. Gestión de Activos como estrategia para asegurar la continuidad en la prestación del servicio. Encuentros con el cliente 2013 ACIEM Cundinamarca 2013.
- [116] Bedoya, R. Carlos M. ISO 55000 Gestión de activos. Una mirada hacia el futuro desde el área de mantenimiento. XXXI Congreso técnico FICEM. 2014. Disponible en: http://www.isa.co/es/sala-de-prensa/Documents/transporte-de-energia-electrica/encuentro-con-el-cliente/2013-09-16_presentacion-gestion-de-activos.pdf
- [117] Noria estrategias en lubricación de clase mundial. www.noria.mx
- [118] PMM Bussiness School. Retorno de la inversión sobre el mantenimiento de activos (RIMA). Disponible en: <http://pmm-bs.com/retorno-inversion-mantenimiento-activos/>

ANEXOS

ANEXO 1. *Layout* o distribuciones en Planta de producción

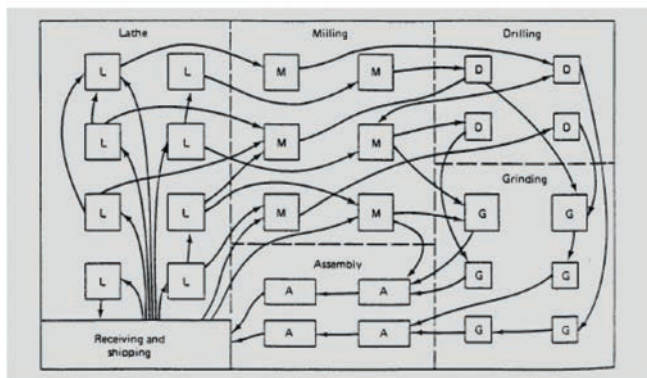
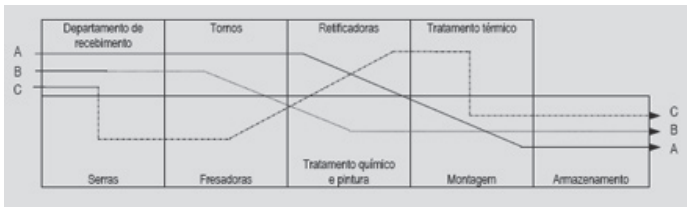
Una distribución o *layout* de planta, es la forma en que se ubican y organizan las máquinas /equipos en una planta de producción, para desarrollar un proceso de fabricación requerido.

A.1 *Layout Job shop* o funcional o Bajo pedido

El *Job Shop* agrupa por secciones equipos que cumplen funciones similares (taller convencional).

Características

- La variedad de formas y tamaños a producir es muy amplia
- Las máquinas son flexibles (propósito general)
- Los tamaños de lote a producir son pequeños
- El layout de planta es funcional (reconFigurable para cada tipo de pieza a fabricar)



Ventajas

- Mejor utilización de máquinas.
- Se requieren menos costes de inversión (máquinas propósito general)
- La flexibilidad es muy elevada.

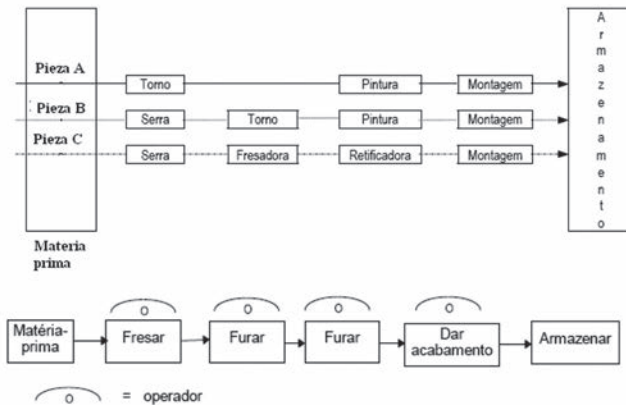
Desventajas

- Las líneas de flujo de material dentro de la planta pueden llegar a ser muy largas, por lo tanto, el costo del manejo de materiales será caro.
- La planificación de la producción y el sistema de control son complejos.
- Tiempos de producción (*lead time*) mayores.
- La cantidad de piezas que en un determinado momento están en proceso de fabricación en la planta, *trabajo en proceso Work In Process WIP*, puede llegar a ser elevado.
- Precisa operarios y supervisores especializados (amplia experiencia y conocimiento)

A.2 Layout Flow shop o por producto

El *Flow shop* se caracteriza por que los equipos se disponen en líneas de flujo completamente definidas, para un producto en particular. Se aplica en la fabricación en serie, por ejemplo, para la fabricación de automóviles. Se trata de partes discretas (unidades completas de producción).

La flexibilidad disminuye frente al *Job Shop*, aplica en fábricas o talleres donde las variedades no son muy amplias pero los tamaños de lote son moderadamente altos.



Ventajas

- Flujo lógico y suave de la producción
- Disminución del *WIP*
- Disminución del tiempo de producción (*Lead time*)
- Líneas de flujo menores, por lo tanto, precisa menor manejo de materiales y reduce este costo
- No precisa operarios ni supervisión especializados (de amplia experiencia y conocimiento). Usualmente las tareas son rutinarias o monótonas.
- La planificación de la producción y sistemas de control son más simples que en Job Shop

Desventajas

- El daño de una máquina implica la parada de la línea ***
- Un cambio en el producto a fabricar implica grandes alteraciones de la planta
- El ciclo de producción está determinado por las máquinas y equipos “cuellos de botella”
- Requiere mayores inversiones en maquinaria, ya que las máquinas son más especializadas

A.3 Layout de producto Fijo o por proyecto

El producto permanece fijo y las máquinas y personas se acercan a él. Ejemplos: astilleros (barcos y submarinos), fábricas de aviones



Ventajas

- Mínimo movimiento de materiales.
- Continuidad de operaciones, por lo tanto, las responsabilidades son reducidas.
- Muy alta flexibilidad
- Centros de producción independientes

Desventajas

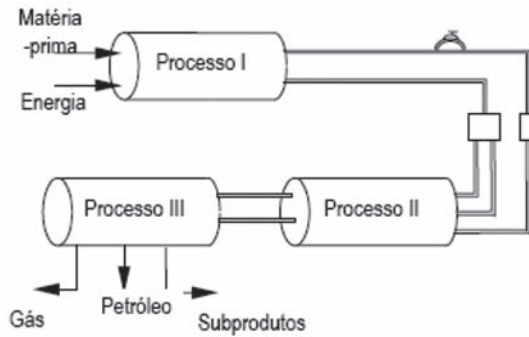
- Se requiere de gran movimiento de equipos y personal.
- Se requiere de elevada duplicación de equipos, para poder atender los diferentes centros de trabajo (cada cuadrado en la imagen del avión)
- Requiere Supervisión general
- Muy bajas tasas de utilización de los equipos.
- Solo se debe implementar cuando sea estrictamente necesario.

A.4 Proceso continuo

De manera similar al *Flow shop* se caracteriza por que los equipos se disponen en líneas de flujo completamente definidas, para un producto en particular. Tiene un campo de aplicación específico para material a granel (azúcar, cemento) o fluidos industria petroquímica, cerveza).

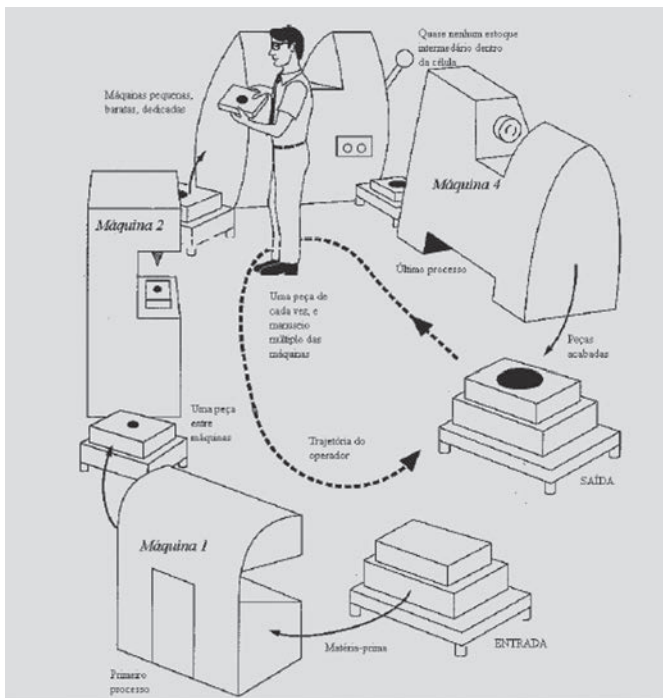
A diferencia del *Flow shop*, aquí no se manejan partes discretas (unidades completas de producción), sino flujos másicos o volumétricos (m^3/h , ton/h, kg/h, li/min, etc.)

Los *layoutJob shop* y *Flow shop* operan para productos discretos (piezas completas), y el layout de proceso continuo es para flujos másicos o volumétricos, no obstante, sus ventajas y desventajas sí son comparables a las del *Flow Shop*.



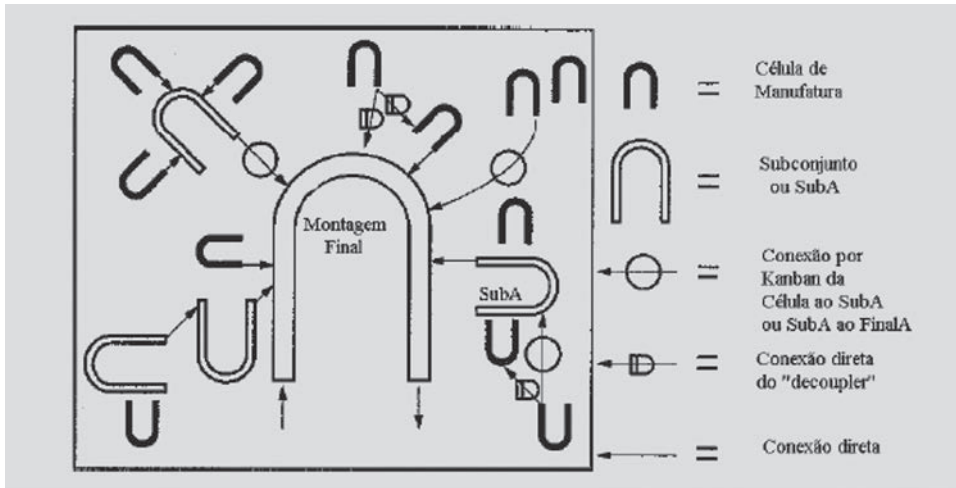
A.5 Layout de Sistemas de Manufactura Flexible

Se agrupan máquinas diferentes pero que procesan productos similares, trabajando en centros o células de trabajo, llamadas *células o celdas de manufactura flexible CMF*. Los cambios de piezas entre estaciones de trabajo o máquinas son automáticos (brazos robóticos, bandas transportadoras, automatismos de manipulación, etc.). la programación y control de trabajo de la CMF se realiza en un PC, por lo tanto, la máquinas y equipos con CNC.



Una combinación de varias CMF, conforman un *Sistema de manufactura flexible SMF*, tal como se puede apreciar en la siguiente Figura.

Hace uso intensivo de la Tecnología de grupos (*Group Technologie*)*



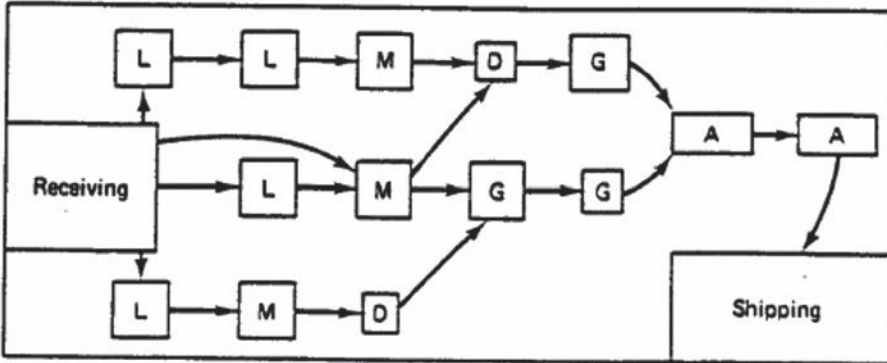
Ventajas

- Se incrementa la utilización de las máquinas.
- Es un compromiso entre el *Job-Shop* y *Flow-Shop*. Suma las ventajas de ambos.
- Se pueden atender tamaños de lote y variedades a producir, intermedios, entre el *Job shop* y el *Flow shop*.
- El sistema es reconFigurable y flexible.
- Los equipos de propósito general.
- Suaviza las líneas de flujo

Desventajas

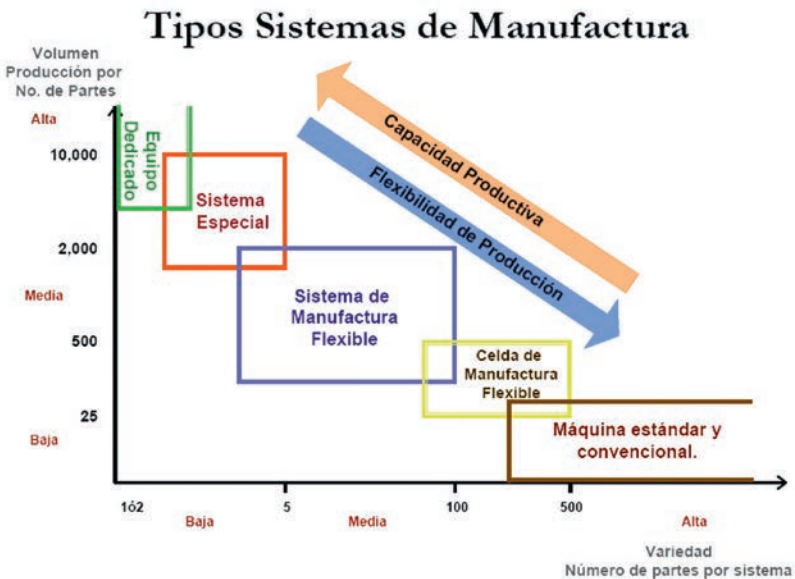
- Requiere supervisión general.
- Requiere mayores niveles de especialización de operarios
- Puede ser necesario almacenamiento para el *WIP*.

- Menores tasas de utilización de máquina que en el *Job-Shop layout*.



Fábrica que operaba con *Job shop* y fue reformada para aplicar Manufactura flexible

En el gráfico *Volumen de partes a producir versus variedad de piezas a producir*, se pueden ubicar los layout de planta previamente vistos.



Por último, en la realidad nacional e internacional existen empresas que manejan layout de planta híbridos, como por ejemplo mezclas de Job shop con Flow shop, Flow shop con manufactura flexible, etc.

ANEXO 2. Conceptos básicos de mecanización y automatización

B.1 Grados de Mecanización y Automatización

Mecanización: fase de desarrollo técnico, en la cual un número de procesos cada vez mayor se realizan utilizando medios mecánicos, donde el trabajador todavía sigue siendo una parte esencial del proceso de producción y está estrictamente sujeto al ritmo de operación del equipo mecánico (definición de la Organización internacional de trabajo OIT).

Automatización: nivel en que el trabajo humano es reemplazado por el uso de máquinas (Definición de la OIT).

Comentario: Mínimamente el operador humano debe hacer un alistamiento de la máquina y su materia prima, y también ejecuta tareas de supervisión de operación.

Control: Desde el punto de vista de la ingeniería, se define el control como la regulación, en forma predeterminada, de la energía suministrada a un sistema; buscando un comportamiento o funcionamiento determinado del mismo.

La Figura 1 muestra las jerarquías de la forma en que se ejecutan las tareas y procesos, comenzando del más básico (Manual), hasta el más elaborado (con control de variables). Cada nivel de la pirámide está asociado con un momento histórico de la evolución de la técnica, la tecnología y la ciencia.

Figura 1. Pirámide de la Automatización



Ejemplo para aclarar la pirámide de la automatización: Elaborar un agujero de diámetro 3/8” en una lámina CR ¼” espesor.

Automatización 1. Máquina / Herramienta: Taladro de árbol con avance automático (variable controlada) / brocas.

Automatización 2. Máquina / Herramienta: Fresadora CNC o centro de mecanizado CNC de husillo vertical /brocas.

B.2 Producción

El término *Producción* hace referencia a las actividades necesarias para fabricar bienes o prestar servicios. Cuantitativamente la producción se materializa en la cantidad de unidades obtenidas o el número de servicios prestados.

B.3 Productividad

La Productividad (fórmula 1), es la relación entre los resultados obtenidos versus los recursos empleados.

$$Pr = \frac{p}{r} \quad (1)$$

Donde

- Pr Es la productividad;
- p Son los productos obtenidos;
- r Son los recursos empleados.

Existen tres formas de medir la productividad: parcial, de factor total y total. En la productividad parcial r se refiere a un recurso en particular. En la productividad de factor total se relaciona la producción neta (producción menos servicios y bienes intermedios comprados), con todos los recursos empleados. En la productividad total se relacionan la producción total o bruta con todos los recursos empleados.

Productividad no es producir más, sino producir bien lo máximo con lo mínimo. En general una máquina/equipo A, es más productivo que otro B de naturaleza similar, si para entregar los mismos productos o servicios:

- Consume menos energía
- Falla menos

- Su tiempo de alistamiento es menor
- Los defectos en la producción o servicio son mínimos
- Los despilfarros y sobrantes son menores
- Como una característica adicional, las máquinas/equipos más productivos usualmente son menos contaminantes (ruido, vibración, fugas, etc.).

Otro aspecto que es necesario tener en cuenta, es el hecho que incrementar la productividad no necesariamente va de la mano con incremento de la rentabilidad de la organización.

Para dar una idea más concreta, la tabla 1 presenta un ejemplo específico con dos máquinas de troquelar metal.

Tabla 1. Comparación de características operativas de dos máquinas troqueladoras

Marca	Modelo	Serie	Cap. Fuerza (ton)	Área mesa	Carrera	Golpes por minuto	Mando	Potencia y tensión motor	Peso (ton)	Dimensiones principales
Liss		H494 52	75	24" x 32"	4-1/2"	40 a 55	Mecáni co a pedal	7.5 HP 220V	7,5	89" x 65" x 125" L x A x H
Niagara	E4-1/2	3467 7	75	24 ½" x 36"	8"	50 aprox.	Jobber Plus PLC	3 HP Voltaje : 440v	6,0	98" x 54" x 144" L x A x H

En la tabla 1 se ha tomado como referencia la máquina *Liss* Se aprecia que para entregar aproximadamente la misma cantidad de golpes por minuto y con la misma fuerza, la máquina *Niagara* requiere:

- Menos potencia en el accionamiento (el costo de energéticos será menor)
- Posee mando remoto (seguridad y ergonomía mejores)
- Es una máquina menos pesada (para propósitos de transporte e instalación)

También se aprecia que el área de trabajo y la carrera en la máquina *Niagara* son más grandes que en la máquina *Liss*, lo que se puede traducir en ampliación de la capacidad y variedad de trabajos a producir.

Este libro introduce al lector en la teoría y práctica básica del mantenimiento industrial, y en su posterior administración, campos en los cuales se ocupan laboralmente la mayoría de egresados de programas de ingeniería y tecnología en Colombia.

El presente trabajo condensa parte de la experiencia y conocimiento del autor, adquiridas a lo largo de nueve años de experiencia en la industria y trece años de experiencia docente, en el campo específico del mantenimiento. Ha participado en varios procesos de acompañamiento y consultorías a empresas.

La obra está concebida para que pueda ser leída y aprovechada no solo por estudiantes universitarios, sino también por otros profesionales y personas ajenas al ámbito académico, y con interés en comprender la función mantenimiento.

Facultad de Tecnología
Colección Textos Académicos

