

# **Mantenimiento de Categoría Mundial**



# **Mantenimiento de Categoría Mundial**

Prof. Klaas Smit

Trabajado al castellano por  
Dr. José Luis Llerena Morán

Delft Academic Press

© Delft Academic Press  
Primera edición 2015

Título original: Onderhoudskunde  
Publicado por  
Delft Academic Press (VSSD Uitgeverij)  
Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, Los Países Bajos

tel. +31 15 27 82124  
dap@vssd.nl  
[www.delftacademicpress.nl/b025.html](http://www.delftacademicpress.nl/b025.html)

Para los profesores que utilicen este libro en sus cursos, la colección de ilustraciones esta en forma electrónica disponible.

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada en sistemas de recuperación o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, o de otra forma, sin el permiso previo y por escrito de la editorial.

*All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.*

ISBN 97890-6562-3768

NUR 800, 950

*Palabras clave:* ingeniería de mantenimiento

# Dedicación

Es verdaderamente para mi un gran honor haber podido trabajar a mi lengua materna la obra del que fue mi maestro científico, tutor y ahora un amigo Prof.emer. Klaas Smit, del cual aprendí ante todo a mirar y trabajar el mantenimiento e ingeniería sistemicamente sin olvidar la responsabilidad del conocimiento.

Agradezco también mucho que mi gran amigo y excolega de trabajo Ing. Jose Luis Moral Bello vocal de la junta directiva de la Asociación Española de Ingenieros de la Industria Farmaceutica y además uno de los mejores Ingenieros que he conocido durante mi carrera se haya ofrecido para leer la traducción, escribir el prólogo y dar valiosos comentarios sobre el trabajo traducido. Un especial agradecimiento deseo dar también a mi hermano Carlos Martin Llerena Moran gran erudito del idioma castellano por sus correcciones del texto así como al Ingeniero y amigo de siempre el Vicepresidente de Ingeniería Lewis Sita Fuentes por sus muy recompensantes y valiosos comentarios. Un agradecimiento en particular para Corien Smit por el excelente y muy profesional layout del texto

Dr. José Luis Llerena Morán  
*Heidelberg, 2015*



# Contenido

Mantenimiento de Categoría Mundial	i	
Dedicación	v	
Prólogo	xv	
<b>1</b>	<b>Desarrollo de la función de mantenimiento</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción	1
1.2	La importancia del mantenimiento	1
1.2.1	<i>Costos de mantenimiento a nivel nacional</i>	1
1.2.2	<i>Costos de mantenimiento a nivel empresarial</i>	4
1.2.3	<i>Costos de mantenimiento a nivel de equipo técnico</i>	5
1.2.4	<i>Costos dependientes de mantenimiento</i>	6
1.3	Influencias externas sobre la función de mantenimiento	13
1.3.1	<i>Requerimientos legales</i>	13
1.3.2	<i>El mercado y los requerimientos del cliente</i>	14
1.3.3	<i>Tiempo de entrega</i>	15
1.3.4	<i>Calidad del producto</i>	16
1.3.5	<i>Precios de costo</i>	17
1.4	Evolución de la función de mantenimiento	19
1.4.1	<i>Gestión de mantenimiento</i>	20
1.4.2	<i>Tecnología de mantenimiento</i>	23
1.4.3	<i>Diseño para el mantenimiento</i>	25
1.5	Avances en la organización de mantenimiento	29
1.5.1	<i>Evolución en la organización del negocio</i>	29
1.5.2	<i>Desarrollo de la organización técnica</i>	30
1.5.3	<i>Organización técnica integrada</i>	32
1.6	Enfoques conceptuales para mantenimiento	33
1.7	Bibliografía	40
<b>2</b>	<b>Comportamiento de mantenimiento de los sistemas técnicos</b>	<b>43</b>
2.1	Introducción	43
2.2	Clasificación de Sistemas Técnicos	44
2.2.1	<i>Clasificación de tipos de sistemas técnicos</i>	44
2.2.2	<i>Clasificación del sistema técnico ST</i>	46
2.2.3	<i>Clasificación ST según la disciplina técnica</i>	48
2.2.4	<i>Información relacionada con el ST</i>	51
2.2.5	<i>Ejemplos de sistemas de clasificación ST</i>	55

2.3	Descripción del comportamiento de avería	56
2.3.1	<i>La cadena causal de avería</i>	57
2.3.2	<i>Categorías de avería</i>	59
2.3.3	<i>Efectos de la avería</i>	60
2.3.4	<i>Diagnóstico y análisis de avería</i>	61
2.3.5	<i>Modo y mecanismo de avería</i>	64
2.3.6	<i>Causa y fuente de avería</i>	67
2.4	Confiabilidad	69
2.4.1	<i>Parámetros de confiabilidad</i>	70
2.4.2	<i>Funciones de distribución</i>	74
2.4.3	<i>Curva de bañera</i>	78
2.5	Mantenibilidad	79
2.6	Disponibilidad ST	82
2.7	Costos de ciclo de vida y rentabilidad	83
2.8	Gestión de rendimiento ST	85
2.8.1	<i>Definiciones de efectividad ST</i>	86
2.8.2	<i>Proceso de trabajo gestión de rendimiento ST</i>	90
2.8.3	<i>Evaluación de la efectividad ST</i>	93
2.8.4	<i>Malos actores</i>	95
2.8.5	<i>Evaluación y selección de malos actores</i>	100
2.9	Eliminación de averías	103
2.9.1	<i>Análisis complementario de los malos actores</i>	103
2.9.2	<i>Análisis causa raíz</i>	107
2.9.3	<i>Propuestas de mejora</i>	109
2.10	Gestión de configuración ST	110
2.11	Bibliografía	113
3	Optimizando el concepto de mantenimiento	115
3.1	Introducción	115
3.2	Mantenimiento correcto e incorrecto	115
3.3	Mantenimiento preventivo y correctivo	121
3.4	Mantenimiento programado y no programado	126
3.5	Políticas de mantenimiento preventivo	128
3.5.1	<i>Mantenimiento preventivo periódico</i>	128
3.5.2	<i>Mantenimiento basado en la condición</i>	133
3.5.3	<i>Políticas de mantenimiento basadas en la condición</i>	135
3.5.4	<i>Intervalos de la verificación de la condición</i>	138
3.5.5	<i>Medición de la condición y métodos de monitoreo</i>	141
3.6	Mantenimiento correctivo	144
3.7	Resumen de políticas de mantenimiento	145
3.7.1	<i>Clasificación de tipos de trabajo</i>	145
3.8	Concepto de mantenimiento para elementos ST dinámicos	147
3.8.1	<i>Método MSG</i>	147
3.8.2	<i>Método RCM</i>	148
3.9	Concepto de mantenimiento para elementos estáticos	159
3.9.1	<i>Requisitos legales</i>	160
3.9.2	<i>Concepto de mantenimiento para equipos a presión</i>	162
3.9.3	<i>Método Inspección basada en riesgo (RBI)</i>	162



<b>3.10</b>	<b>Concepto de mantenimiento para sistemas instrumentados de seguridad</b>	166
3.10.1	<i>Análisis de capas de protección (LOPA)</i>	167
3.10.2	<i>Ejecución de LOPA</i>	168
3.10.3	<i>Iniciación y ejecución del mantenimiento preventivo (PM)</i>	171
3.10.4	<i>Tareas PM en la estructura de la orden de trabajo</i>	172
3.10.5	<i>Iniciando proyectos de mantenimiento</i>	174
3.10.6	<i>Evaluando la efectividad del concepto de mantenimiento</i>	176
3.10.7	<i>Escalada de intervalo</i>	179
3.10.8	<i>Cadenas de retroalimentación en mantenimiento</i>	182
<b>3.11</b>	<b>Bibliografía</b>	184
<b>4</b>	<b>Diseño para mantenimiento</b>	187
<b>4.1</b>	<b>Introducción</b>	187
<b>4.2</b>	<b>Fases y productos de las fases en los proyectos de inversión</b>	187
4.2.1	<i>Estudio de factibilidad</i>	188
4.2.2	<i>Diseño conceptual</i>	188
4.2.3	<i>Ingeniería básica</i>	189
4.2.4	<i>Diseño detallado</i>	189
4.2.5	<i>Fabricación, construcción y montaje</i>	190
4.2.6	<i>Puesta en marcha</i>	190
4.2.7	<i>Gestión de proyectos y organización</i>	191
4.2.8	<i>Gestión de configuración y análisis de riesgo</i>	191
4.2.9	<i>Inversiones en la fase de uso</i>	192
4.2.10	<i>La reutilización o demolición</i>	193
4.2.11	<i>Situación actual en proyectos de inversión</i>	194
<b>4.3</b>	<b>Desarrollos en proyectos de inversión</b>	197
4.3.1	<i>Planificación de inversiones</i>	197
4.3.2	<i>Tipos de contrato y formas de colaboración</i>	198
<b>4.4</b>	<b>Ingeniería de sistemas e ingeniería concurrente</b>	203
4.4.1	<i>Características de la ingeniería de sistemas</i>	203
4.4.2	<i>Ingeniería concurrente</i>	206
4.4.3	<i>Especificaciones ST</i>	207
<b>4.5</b>	<b>Gestión de proyectos de inversión</b>	212
4.5.1	<i>Gestión financiera de proyectos de inversión</i>	213
4.5.2	<i>Elaboración de presupuestos y cálculo</i>	214
4.5.3	<i>Organización de proyecto</i>	216
4.5.4	<i>Apoyo TIC en los proyectos de inversión</i>	218
<b>4.6</b>	<b>Diseño para mantenimiento</b>	219
4.6.1	<i>La importancia del diseño para mantenimiento</i>	220
4.6.2	<i>Diseño para mantenimiento como proceso de trabajo</i>	221
4.6.3	<i>DpM en las fases estudio de factibilidad y diseño conceptual</i>	222
4.6.4	<i>Diseño para mantenimiento en la fase de ingeniería básica</i>	224
4.6.5	<i>Diseño para mantenimiento en la fase de diseño detallado</i>	226
4.6.6	<i>Diseño en las fases de construcción y puesta en marcha</i>	229
<b>4.7</b>	<b>Diseño para la confiabilidad</b>	232
4.7.1	<i>Modelos RAMS</i>	233
4.7.2	<i>Modo de avería, efectos y análisis de criticalidad (FMECA)</i>	239

4.7.3	<i>Análisis de árbol de falla</i>	241
4.8	<b>Diseño para seguridad</b>	243
4.8.1	<i>La importancia del diseño para seguridad</i>	243
4.8.2	<i>Asegurando la seguridad durante la fase de uso</i>	248
4.8.3	<i>Clasificación e investigación de calamidades</i>	251
4.9	<b>Evaluación de diseño para mantenimiento</b>	254
4.9.1	<i>Medidas en las fases de ingeniería básica y diseño conceptual</i>	255
4.9.2	<i>Medidas en la fase de diseño detallado</i>	256
4.10	<b>Diseño para costos mínimos de ciclo de vida</b>	259
4.10.1	<i>Objetivos costo ciclo de vida</i>	259
4.10.2	<i>Diseño para costos de ciclo de vida</i>	261
4.10.3	<i>Modelos LCC</i>	262
4.10.4	<i>Estructura costos de ciclo de vida</i>	266
4.10.5	<i>Métodos de evaluación financiera</i>	268
4.11	<b>Bibliografía</b>	271
5	<b>Workflow management</b>	273
5.1	<b>Introducción</b>	273
5.2	<b>Objetivos de la gestión de flujo de trabajo</b>	273
5.2.1	<i>Volumen de trabajo</i>	275
5.2.2	<i>Niveles de mantenimiento</i>	277
5.2.3	<i>Carga de trabajo DT</i>	278
5.3	<b>Gestión de cadena de suministro</b>	281
5.3.1	<i>Relaciones cliente proveedor</i>	282
5.3.2	<i>Entrega al cliente libre y obligatoria</i>	283
5.3.3	<i>Gestión de cadena para el DT</i>	284
5.3.4	<i>Estructura de la orden de trabajo</i>	286
5.4	<b>Carga de trabajo y enrutamiento</b>	288
5.4.1	<i>La programación de los tipos de trabajo</i>	288
5.4.2	<i>Armonización de la carga de trabajo y recursos</i>	289
5.4.3	<i>Relación entre procesos de trabajo</i>	291
5.4.4	<i>Optimización de la planificación y programación</i>	291
5.4.5	<i>El procesamiento de tipos de trabajo</i>	293
5.5	<b>Fases de flujos de trabajo</b>	295
5.5.1	<i>Aceptación y asignación de una solicitud de trabajo</i>	295
5.5.2	<i>Planificación técnica</i>	300
5.5.3	<i>Planificación administrativa</i>	301
5.5.4	<i>Cálculo, estimación y órdenes de trabajo repetitivas</i>	304
5.5.5	<i>Programación</i>	307
5.5.6	<i>Ejecucion, terminacion y evaluación</i>	314
5.6	<b>Flujo de trabajo basado en proyectos</b>	317
5.6.1	<i>Características de un proyecto de mantenimiento</i>	317
5.6.2	<i>Faseado del proceso mantenimiento basado en proyectos</i>	318
5.6.3	<i>Resultados de la investigación</i>	321
5.6.4	<i>Factores críticos de éxito</i>	322
5.7	<b>Externalización</b>	328
5.7.1	<i>Los motivos y objetivos de la externalización</i>	328
5.7.2	<i>Desarrollos en la externalización del mantenimiento</i>	331
5.7.3	<i>Gestión de ciclo de vida</i>	333

5.7.4	<i>Tipos de contrato de mantenimiento</i>	336
5.7.5	<i>Objetivos de la externalización, política y condiciones</i>	343
5.8	<b>Bibliografía</b>	346
<b>6</b>	<b>Logística DT</b>	349
6.1	Introducción	349
6.2	Gestión de cadena	350
6.2.1	<i>Proceso no recurrente</i>	351
6.2.2	<i>Proceso recurrente</i>	352
6.2.3	<i>Objetivos logística DT</i>	352
6.3	Diseño ST y requisitos de artículos	353
6.4	Actividades DT y requisitos del artículo	358
6.4.1	<i>Concepto de mantenimiento y requisitos del artículo</i>	358
6.4.2	<i>Niveles de mantenimiento y requisitos de artículo</i>	361
6.5	Gestión de artículo	363
6.5.1	<i>Identificación de artículo y clasificación</i>	364
6.5.2	<i>Gestión de archivo de artículos</i>	367
6.6	Control de inventario de artículo	372
6.6.1	<i>Clasificación de artículo para provisión de artículo</i>	372
6.6.2	<i>Clasificación de artículos para control de inventario</i>	374
6.6.3	<i>Control de inventario de artículo</i>	376
6.6.4	<i>Gestionando artículos reparables</i>	381
6.6.5	<i>Elementos de riesgo</i>	384
6.6.6	<i>Clasificación ABC</i>	385
6.7	Aspectos económicos y organizativos	388
6.7.1	<i>Niveles de servicio</i>	388
6.7.2	<i>Almacenamiento y manejo de artículos</i>	390
6.7.3	<i>Compras técnicas</i>	392
6.7.4	<i>La asignación de costos ASF</i>	394
6.7.5	<i>Responsabilidades en la logística DT</i>	398
6.7.6	<i>Evaluación logística DT</i>	401
6.8	Bibliografía	402
<b>7</b>	<b>Organización de la función de mantenimiento e ingeniería</b>	403
7.1	Introducción	403
7.2	Desarrollo de la organización del DT	404
7.2.1	<i>Desarrollos de la organization operacional</i>	404
7.2.2	<i>Desarrollo de la organización DT</i>	405
7.2.3	<i>Función M&amp;I en empresas grandes</i>	410
7.3	La asignación de funciones M&I de acuerdo a los niveles de mantenimiento	413
7.3.1	<i>Tipo de ST y organización de mantenimiento</i>	413
7.3.2	<i>Factores que influyen la organización DT</i>	415
7.3.3	<i>Centralización contra descentralización</i>	418
7.3.4	<i>Resumen de la descentralización frente a la centralización</i>	424
7.3.5	<i>Desarrollos en centralización frente a descentralización</i>	426
7.4	Subordinación o igualdad del DT	429

7.4.1	<i>Características de igualdad y subordinación</i>	429
7.4.2	<i>Criterios de igualdad</i>	430
7.4.3	<i>Criterios de subordinación</i>	431
7.5	<b>Formas de relación</b>	432
7.5.1	<i>Definición de las formas de relación</i>	432
7.5.2	<i>Staff y funciones de apoyo</i>	435
7.5.3	<i>Relaciones cliente-proveedor</i>	436
7.6	<b>Diferenciación horizontal</b>	438
7.6.1	<i>Criterios de diferenciación horizontal en la ejecución</i>	439
7.6.2	<i>Diferenciación horizontal dentro de la gestión de mantenimiento</i>	442
7.6.3	<i>Diferenciación horizontal dentro de la tecnología de mantenimiento</i>	447
7.6.4	<i>Estructura de la función M&amp;I y desarrollos adicionales</i>	451
7.7	<b>Diferenciación vertical</b>	454
7.7.1	<i>Nivel de ejecución</i>	455
7.7.2	<i>Nivel de supervisión</i>	456
7.7.3	<i>Nivel de gestión</i>	456
7.8	<b>Estructura de consultoría</b>	457
7.8.1	<i>Consultoría operacional</i>	458
7.8.2	<i>Consultoría táctica</i>	460
7.8.3	<i>Consultoría estratégica</i>	462
7.8.4	<i>Definición de roles</i>	463
7.9	<b>Enfoque de las ciencias de comportamiento</b>	464
7.9.1	<i>Desarrollo del enfoque de la ciencia del comportamiento</i>	464
7.9.2	<i>Grupos autónomos de trabajo</i>	465
7.9.3	<i>El proceso de cambio</i>	467
7.9.4	<i>Fases del proceso de diseño</i>	469
7.10	<b>Mantenimiento productivo total</b>	471
7.10.1	<i>Desarrollo y objetivo de TPM</i>	471
7.10.2	<i>Desarrollo del programa TPM</i>	473
7.11	<b>Bibliografía</b>	475
8	<b>Evaluación de la función DT</b>	477
8.1	<b>Introducción</b>	477
8.2	<b>Proceso estratégico</b>	477
8.2.1	<i>Objetivos, política y planes</i>	478
8.2.2	<i>Planes y objetivos operacionales</i>	481
8.2.3	<i>Efectividad, eficiencia y productividad</i>	482
8.3	<b>Rentabilidad de mantenimiento</b>	483
8.3.1	<i>Objetivos de producción</i>	483
8.3.2	<i>Benchmarking</i>	486
8.3.3	<i>Ejemplos prácticos de benchmarking</i>	488
8.4	<b>Gestión de rendimiento ST</b>	494
8.4.1	<i>Cuadro de mando integral empresarial y PI</i>	495
8.4.2	<i>Gestión de rendimiento</i>	497
8.5	<b>Evaluación de la gestión de rendimiento ST</b>	500
8.5.1	<i>Procesos de trabajo gestión de rendimiento ST</i>	500
8.5.2	<i>Evaluación del proceso de trabajo gestión de rendimiento ST</i>	501
8.6	<b>Evaluación del proceso de trabajo gestión de configuración</b>	506
8.6.1	<i>Proceso de gestión de la configuración</i>	506

8.6.2	<i>Evaluación del proceso de trabajo gestión de configuración</i>	509
8.7	<b>Evaluación del proceso de trabajo gestión del concepto de mantenimiento</b>	510
8.7.1	<i>Subproceso eliminación de averías</i>	511
8.7.2	<i>Subproceso optimización del concepto de mantenimiento</i>	513
8.8	<b>Evaluación de la gestión de flujo de trabajo</b>	517
8.8.1	<i>Subprocesos de la gestión flujo de trabajo</i>	517
8.8.2	<i>Parámetros generales de evaluación en la gestión flujo de trabajo</i>	519
8.8.3	<i>Parámetros específicos por subproceso</i>	522
8.8.4	<i>Productividad laboral</i>	524
8.9	<b>Evaluación de los procesos de trabajo en gestión de recursos</b>	529
8.9.1	<i>Subprocesos gestión del personal y gestión del conocimiento</i>	529
8.9.2	<i>Gestión de conocimiento y competencia</i>	532
8.9.3	<i>Evaluación de los subprocesos gestión de personal y gestión de conocimiento</i>	533
8.9.4	<i>Subproceso gestión de artículos, servicios and facilidades</i>	535
8.10	<b>Gestión financiera</b>	538
8.10.1	<i>Un numero de términos y definiciones comerciales y financieras</i>	538
8.10.2	<i>Tipos de presupuesto</i>	541
8.10.3	<i>Concepción del presupuesto de mantenimiento, informes y evaluación</i>	544
8.10.4	<i>Evaluación de contrato</i>	547
8.11	<b>Evaluación y mejora continua</b>	548
8.11.1	<i>Evaluación en contexto</i>	549
8.11.2	<i>Mejora continua</i>	550
8.12	<b>Bibliografía</b>	555
<b>9</b>	<b>Suministro de información para el DT</b>	557
9.1	<b>El desarrollo del suministro de información</b>	557
9.1.1	<i>Hardware</i>	557
9.1.2	<i>Software del sistema</i>	558
9.1.3	<i>Software de aplicación</i>	559
9.1.4	<i>'Peopleware'</i>	560
9.2	<b>Sistemas de control de producción</b>	561
9.2.1	<i>Conceptos y control de producción</i>	561
9.2.2	<i>Apoyo TIC para toda la empresa</i>	562
9.3	<b>El modelo TSM</b>	564
9.3.1	<i>Desarrollo de TSM</i>	564
9.3.2	<i>Modelo de gestión TSM</i>	565
9.3.3	<i>Proceso TSM, función y modelo de datos</i>	567
9.4	<b>Investigación sobre el uso de CMMS</b>	570
9.4.1	<i>Estudio sobre funcionalidades CMMS disponibles y usadas</i>	570
9.4.2	<i>Causas del uso limitado de CMMS</i>	573
9.4.3	<i>Conclusiones para un mayor uso de CMMS</i>	574
9.5	<b>Apoyo TIC para la gestión de mantenimiento</b>	575
9.5.1	<i>Apoyo TIC para la gestión flujo de trabajo</i>	576
9.5.2	<i>Apoyo TIC para gestión de recursos</i>	579
9.5.3	<i>Apoyo TIC para el control financiero</i>	581
9.6	<b>Apoyo TIC para la tecnología de mantenimiento</b>	585

9.6.1	<i>Apoyo TIC para la gestión de rendimiento TIC</i>	585
9.6.2	<i>Apoyo TIC para la gestión de configuración ST</i>	587
9.6.3	<i>Apoyo TIC para la gestión del concepto de mantenimiento</i>	590
9.7	<b>Apoyo TIC para diseño de mantenimiento</b>	595
9.7.1	<i>Apoyo TIC para gestión de proyectos</i>	595
9.7.2	<i>Apoyo TIC para el estudio de factibilidad y fases del diseño conceptual</i>	596
9.7.3	<i>Apoyo TIC para la fase de ingeniería básica</i>	596
9.7.4	<i>Apoyo TIC para la fase de diseño detallado</i>	597
9.7.5	<i>Apoyo TIC para la construcción y puesta en marcha</i>	598
9.8	<b>Desarrollos en sistemas de control de proceso</b>	599
9.8.1	<i>Sistemas locales y de control</i>	599
9.8.2	<i>Sistemas de gestión de producción y mantenimiento</i>	600
9.9	<b>Apoyo TIC para la información de gestión</b>	601
9.10	<b>Planificación TIC</b>	606
9.11	<b>Bibliografía</b>	610
	<b>Diccionario</b>	613
	<b>Índice</b>	617

# Prólogo

Conocí a José Luis allá por los noventa con motivo de la implantación del módulo PM (Mantenimiento) de SAP en la afiliada española de nuestra Compañía, cuya Ingeniería yo dirigía y aún dirijo. Dado que el sistema SAP se estaba implantando en las principales Áreas funcionales de la Compañía, y yo había contemplado la forma en que se estaba realizando, por otra parte la más habitual, que era contratando una consultora externa con experiencia en éste tipo de implantaciones.

José Luis nos propuso un esquema de implantación de nuestro módulo completamente distinto: realizar una implantación por nosotros mismos. Aquella propuesta me ocasionó una inquietud, derivada de la incertidumbre de acometer una tarea desconocida y que había visto muy compleja en otras áreas funcionales. Por otra parte suponía un reto fascinante.

Nos propuso una organización reducida pero a la vez muy eficaz y .... manos a la obra, empezamos a trabajar. La grata sorpresa de nuestro reducido equipo ( y de todos los que nos rodeaban) fue comprobar cómo se iban cumpliendo los plazos y las metas, y cómo alcanzamos nuestro objetivo final sin distorsiones ni problemas de relieve. Fue un éxito en toda regla, propiciado por las “artes” de conocimiento y en especial organizativas de José Luis que había conseguido no sólo una implantación customizada a un coste mínimo, sino un equipo motivado y “entregado” a aquellos proyectos de colaboración que con él pudieran surgir.

De hecho surgió otro con posterioridad de gran interés en el que tuve la fortuna de participar y que consistió en el desarrollo de un prototipo para todas las afiliadas a nivel mundial de los módulos PM (Mantenimiento) y PS (Proyectos), que posteriormente y con un reducido trabajo permitiera su customización en cada afiliada.

A partir de áquel momento José Luis pasó a ser un miembro destacado de nuestro equipo con quien nos sentimos muy unidos a pesar de la distancia física y con quien compartimos muchos problemas y sus soluciones de nuestro día a día.

Desde entonces y hasta hoy José Luis fue desarrollando su actividad como Manager para Europa de Ingeniería y posteriormente como Director de Ingeniería y Mantenimiento de uno de los más importantes y mayores Sites de la Compañía multinacional para la que trabajamos, lo que le ha permitido tener una idea local por países y global de los problemas que afectan al mundo de la Ingeniería y Mantenimiento.

Su libro trabajo de la obra de su tutor doctoral Prof.emer. K. Smit, que tengo el honor de presentar constituye un compendio de todos los conocimientos y experiencias a que antes me refería y es en mi criterio un referente necesario en el escenario actual, en el que tanto él como yo identificamos muchos “gaps” conceptuales que él cubre de forma magistral a lo largo del presente trabajo.

Para todos aquellos profesionales del mundo de la Ingeniería y Mantenimiento , José Luis desarrolla a lo largo del presente trabajo un nuevo concepto de enorme utilidad y a la vez sencillo entendimiento: el de la Ingeniería del Mantenimiento que permite solucionar muchos de los problemas principalmente de carácter organizativo que hoy atenazan las estructuras técnico-organizativas de las grandes empresas.

Deseo que disfrutéis con su lectura como yo lo he hecho.

**José Luis Moral Bello**

Gerente de Ingeniería, Mantenimiento y vocal  
de la junta directiva de la Asociación Española de  
Ingenieros de la Industria Farmaceutica

*Madrid, 2015*







# Capítulo 1

## Desarrollo de la función de mantenimiento

### 1.1 Introducción

Este capítulo estudia el desarrollo del mantenimiento industrial. La importancia del mantenimiento es vista desde los puntos de vista nacional, empresarial y técnico para después caracterizar la importancia a través de los costos relativos del mantenimiento. En primer lugar se examinará la influencia del mantenimiento sobre la función principal de la empresa, es decir la producción u operaciones. Después se pondrá atención a la influencia de los desarrollos del entorno externo de la organización sobre la función de mantenimiento. A continuación, se analizarán los diferentes desarrollos de las fases de la función de mantenimiento, es decir, la gestión de mantenimiento, la tecnología de mantenimiento así como el diseño para mantenimiento. Por último se explicarán diferentes enfoques conceptuales de la función de mantenimiento.

### 1.2 La importancia del mantenimiento

La importancia del mantenimiento puede ser expresada a través de los costos reales directos y los costos relativos de mantenimiento. Otra señal de la importancia del mantenimiento es el nivel de los costos dependientes de mantenimiento, como por ejemplo las pérdidas de producción relacionadas con el mantenimiento. La suma de los costos directos y los costos dependientes de mantenimiento se identifica como el costo total de mantenimiento.

#### 1.2.1 *Costos de mantenimiento a nivel nacional*

No existe prácticamente ninguna cifra conocida sobre el nivel de los costos de mantenimiento a nivel nacional. El servicio de estadística en Holanda recopila los datos sobre los costos de mantenimiento, pero esta información se refiere exclusivamente a los ser-

vicios de mantenimiento interno y materiales. Sin embargo es posible hacer una estimación analítica de los costos de mantenimiento a nivel nacional. Tal estimación requiere el conocimiento del monto de la oferta de bienes de capital del gobierno y de cada sector empresarial de acuerdo a la clasificación internacional industrial uniforme (CIU) de todas las actividades económicas. La estimación aproximada de los costos de mantenimiento nacionales se hace luego haciendo uso de los valores históricos para los costos de mantenimiento anual como porcentaje del valor de reposición (VR) de los bienes de capital por cada sector.

Investigaciones realizadas hace varios años en los Países Bajos y Alemania revelaron que el mantenimiento a nivel nacional asciende a aprox. 10% del Producto Bruto Interno (PBI). El PBI equivale aproximadamente al valor agregado de todos los bienes y servicios producidos por una economía en un período determinado. El valor agregado es el valor que se añade a un producto o servicio entregado, en el proceso empresarial, es decir, la diferencia entre el precio de venta y el precio de compra de los bienes, servicios e instalaciones. Estos costos no incluyen los costos dependiente de mantenimiento (CDM) o la pérdida de ingresos debido a la pérdida de producción como consecuencia de mantenimiento.

Investigaciones realizadas por la Universidad de Tecnología de Eindhoven (Enden, 1979) revelaron la siguiente distribución de los costos de mantenimiento a nivel nacional (10% PBI). Los costos fueron desglosados, a través de los distintos sectores empresariales de la siguiente manera:

Equipos de producción	34%
Equipos de transporte	19%
Edificios	22%
Carreteras	6%
Viviendas	19%

Estas cifras indican que el mantenimiento relacionado con los edificios e ingeniería civil se encuentra aproximadamente a la misma escala que el mantenimiento de los equipos de producción y de los equipos de transporte. En términos relativos, en la mayoría de los sectores el costo de mantenimiento por valor de reposición está cayendo, como resultado de una menor demanda del mantenimiento, gracias a un mejor diseño y mejor calidad de los bienes de capital. Existe la sospecha de que esta caída es de la misma magnitud que el aumento en los costos de mantenimiento debido al aumento de los bienes de capital.

La antigua asociación nacional alemana de mantenimiento DKIN realizó otro estudio sobre los costos de mantenimiento en 1980. Este estudio se basó en mejores datos estadísticos pero reveló también que el mantenimiento a nivel nacional asciende aprox. al 10% del Producto Bruto Interno (PBI). En este estudio, los costos de mantenimiento se desglosan en base a los diferentes tipos de capital de la siguiente manera:

Maquinas	37%
Equipos de transporte	10%
Edificios	12%
Carreteras	8%
Viviendas	14%
Hogares privados	19%

Los resultados del estudio alemán son solo parcialmente comparables con los resultados del estudio holandés, debido a que las clasificaciones industriales estándar no se habían establecido todavía en el momento del estudio, y debido a que las cifras de estudio alemán incluyen mantenimiento de los bienes de consumo en los hogares privados. La proporción representada por el mantenimiento de hogar es de hecho particularmente notable. De los estudios se puede sacar como conclusión que el nivel de mantenimiento nacional cuesta aprox. 10% del PIB, lo cuál en año 2007, fue de aprox. € 50 mil millones en Holanda (\$ 7,3 billones a nivel mundial).

La magnitud de los costos de mantenimiento a nivel nacional justifica claramente una mayor atención sobre este tema a todo nivel de educación técnica regular así como más investigación universitaria. Sin embargo, hoy en día sigue siendo la atención e investigación bastante limitada.

La Educación de los peritos de mantenimiento en las escuelas Profesional técnica ha desaparecido casi por completo en los Países Bajos y Europa, debido sobre todo a la reducción de costos y en parte a la concentración sobre las actividades principales. Lo mismo le ha ocurrido a las escuelas internas empresariales, que han sido cerradas también casi por completo.

Muchos alumnos con nivel de educación general secundaria pre profesional (VMBO), fueron transferidos al sistema de aprendizaje industrial, debido en parte al aumento de alumnos pero también a los niveles inadecuados obtenidos por estos alumnos dentro de ese nivel. Sin embargo, el número de peritos técnicos fueron y siguen siendo demasiado bajos en relación a la demanda de estos (Anon, 1997).

La enseñanza técnica en las escuelas de formación profesional de los Países Bajos (MBO) tampoco llena la demanda descrita anteriormente. Por esa razón, desde hace años, los peritos de mantenimiento han tenido que ser reclutados de las escuelas técnica superior (MST). A pesar de eso la educación en las escuelas técnica superior (MST) no se puede ver como una verdadera formación profesional para los peritos de mantenimiento (Smit, 1991). En colaboración con los Centros Regionales de Formación (ROC), las empresas tendrán que asumir la responsabilidad de la formación de su propia mano de obra calificada.

Las universidades técnicas de ciencias aplicadas capacitan hoy en día a los futuros gerentes de mantenimiento así como a los ingenieros de diseño y proyectos. Sería más deseable que dentro de estos programas de estudio se centrara más atención explícita a la gestión y diseño

de mantenimiento (Design for Maintenance). En la actualidad esa atención sigue siendo muy limitada, aunque un número de universidades técnicas de ciencias aplicadas han desarrollado en los últimos años especializaciones específicas en el campo del mantenimiento.

La educación técnica académica dentro de las Universidades Técnicas proporciona una base para los futuros gerentes del Departamento Técnico (DT) y para los ingenieros de proyecto (Smit, 1987). En las universidades técnicas de los Países Bajos la atención educacional investigativa centrada sobre temas relacionados con el campo de la aplicación del mantenimiento a nivel profesional sigue siendo limitada, a pesar que muchas universidades técnicas han estado gradualmente tomando una serie de medidas necesarias para cambiar esta situación.

Es de vital importancia que no solamente los futuros gerentes del Departamento Técnico (o mantenimiento e Ingeniería M&I), sino también los futuros directores de empresas y gerentes de producción adquieran una cierta comprensión sobre la importancia de la gestión del mantenimiento durante su formación inicial, para que esta mayor comprensión sea demostrada a través de las funciones primarias de negocios en esta área temática compleja.

La magnitud de los costos de mantenimiento nacionales justifica un perfeccionamiento en forma que se unan los recursos con fines de investigación y transferencia de conocimiento, por ejemplo en formación de un instituto nacional de mantenimiento o un proyecto de colaboración entre las distintas asociaciones relacionadas con el mantenimiento y las universidades, claro en estrecha colaboración con los sectores privado y gubernamental. Parece que los intentos realizados por el Instituto Holandés de mantenimiento de Clase Mundial en este sentido han mostrado resultados respetables a nivel regional, que pueden ser ampliados a nivel nacional.

### 1.2.2 Costos de mantenimiento a nivel empresarial

En el sentido empresarial los costos de mantenimiento deben ser tomados de la siguiente manera:

- Costos salariales (directos / indirectos) del propio personal de mantenimiento de la compañía
- Costos de repuestos y materiales utilizados
- Costos por la utilización de terceros.

La magnitud de los costos de mantenimiento a nivel empresarial, depende por supuesto en gran medida de la escala y la naturaleza de la propia empresa y del equipo de producción o sistemas técnicos (ST) utilizados. Un estudio realizado en Inglaterra (HMSO, 1978) muestra la proporción de los costos de mantenimiento como porcentaje de los siguientes indicadores:

Volumen de ventas	2-5%
Costos de producción	3-15%
Valor añadido	5-30%

Estas cifras muestran que la proporción de los costos de mantenimiento en el valor añadido puede ser bastante considerable, sobre todo en empresas de intensivo capital. Los costos de mantenimiento como porcentaje del valor añadido (volumen de ventas menos costos variables) es un indicador relevante para el esfuerzo del mantenimiento, porque el valor añadido es una variable de empresa que puede ser influenciada. De esta manera, se establece una relación entre el esfuerzo de producción por un lado y la escala de los costos de mantenimiento por el otro. Lo mismo no se aplica, cuando los costos de mantenimiento son vistos exclusivamente como un porcentaje del valor de reposición del sistema técnico. Porque de esta manera no se pone de manifiesto, las consecuencias para mantenimiento de un cambio en las actividades de producción.

Incluso los costos de mantenimiento a nivel empresarial enumerados arriba, no incluyen los costos de las pérdidas de ingresos relacionadas con mantenimiento. Los costos dependientes de mantenimiento, a veces referidos incorrectamente como costos de mantenimiento indirectos, son los costos derivados de las pérdidas de ingresos y de los gastos adicionales para ponerse al día con las pérdidas de producción provocadas por mantenimiento, así como los costos de la capacidad de producción potencialmente disponible, si esta puede ser vendida. La importancia de la función de mantenimiento en ciertas empresas de capital intensivo es también revelada por ejemplo en la relación entre el número de equivalentes a tiempo completo (ETC) utilizados en la producción en comparación con el número de ETC internas y externas utilizadas para mantenimiento. En algunos sectores, el número de obreros es de hecho más alto que el número de operadores. No obstante, incluso en las fábricas automatizadas del futuro, seguirá habiendo siempre una necesidad de obreros.

### 1.2.3 Costos de mantenimiento a nivel de equipo técnico

La magnitud de los costos anuales de mantenimiento por ST (Sistema Técnico) suele estar relacionada con el valor de reposición de los ST en cuestión. En promedio, estos costos son aproximadamente del 5% para los equipos de producción y aproximadamente del 1% para los edificios (Marcelis, 1979). No obstante, estos porcentajes son muy dependientes de la naturaleza y del modo de empleo de los ST en cuestión. La lista a continuación muestra la relación entre los gastos de mantenimiento y el valor de reposición de una serie de instalaciones técnicas, donde los gastos de mantenimiento a lo largo de toda la vida útil fueron convertidos al valor actual neto:

Barcos	0,3
Autobuses	0,5
Aeronaves civiles	2
Barcos de guerra	1,5
Tanques de batalla	2,5
Aviones de combate	4-6

Naturalmente estas cifras son solamente indicadores. La escala real depende en gran medida no sólo de la naturaleza del sistema técnico, sino también del método e intensidad

del uso y del tiempo de vida prospectiva. Los costos de mantenimiento, sobre todo de los sistemas militares son relativamente altos. La complejidad de los sistemas, la tecnología avanzada y la forma de utilización son las causas subyacentes. Como promedio aproximado, la suma de los costos de mantenimiento durante la vida entera de un ST es aproximadamente igual al valor de reposición del ST.

Una investigación realizada en una serie de empresas dentro de un grupo químico sobre los costos anuales de mantenimiento como porcentaje del valor de reposición de bombas centrífugas reveló un margen que oscila entre cero y 800%. Esta enorme discrepancia ilustra la necesidad de comprender plenamente los costos de mantenimiento a nivel individual del tipo de objeto y sus condiciones de funcionamiento, con el fin de identificar la intensidad de mantenimiento. Desafortunadamente, este nivel de comprensión o entendimiento no se da en muchas empresas. Los costos de mantenimiento a menudo no se atribuyen a los niveles de ST inferiores (componentes), sino se cargan directamente en nivel más alto de centros de costo. Además, el valor de reposición de los objetos individuales es a menudo desconocido. La comprensión de los objetos de mantenimiento intensivo revela la conveniencia de adoptar medidas, tales como hacer modificaciones y optar por productos más confiables o de más bajo mantenimiento como consecuencia de lo cuál los costos de mantenimiento y el tiempo de parada del ST se pueden reducir considerablemente.

#### 1.2.4 *Costos dependientes de mantenimiento*

Los costos de mantenimiento que se reportan periódicamente a la administración financiera no son a menudo los costos totales de mantenimiento. El mantenimiento, por ejemplo llevado a cabo por los operadores, no está sujeto a la responsabilidad de mantenimiento o la función de ingeniería (Departamento Técnico DT). Con el fin de mantener una plena comprensión de la evolución de los costos de mantenimiento, y además administrar estos costos, todos los costos tendrán que ser reproducidos de manera explícita en los reportes de costos.

La figura 1.1 muestra la relación entre el desarrollo macroeconómico y la contribución de las empresas manufactureras a este desarrollo así como también la influencia del desarrollo económico sobre el Sistema Técnico y la función de mantenimiento. Los términos subrayados se refieren a los bloques en la figura anterior.

Durante largos períodos de tiempo, el volumen de producción nacional mostró un crecimiento anual de entre el 1 y el 4%. Este crecimiento fue debido en parte a la expansión de la capacidad productiva. Una característica general de las nuevas generaciones de sistemas técnicos es como regla el aumento gradual de la capacidad por unidad productiva o crecimiento en la economía de escala.

El crecimiento de la economía de escala se ha observado prácticamente en todos los sectores industriales, por ejemplo en una mayor capacidad de carga en aviones de pasajeros, una mayor capacidad de transporte en petroleros de crudo, una mayor capacidad de fusión en altos hornos, un mayor rendimiento en plantas químicas y una mayor potencia de salida de una unidad de generación en las centrales eléctricas, etcétera.



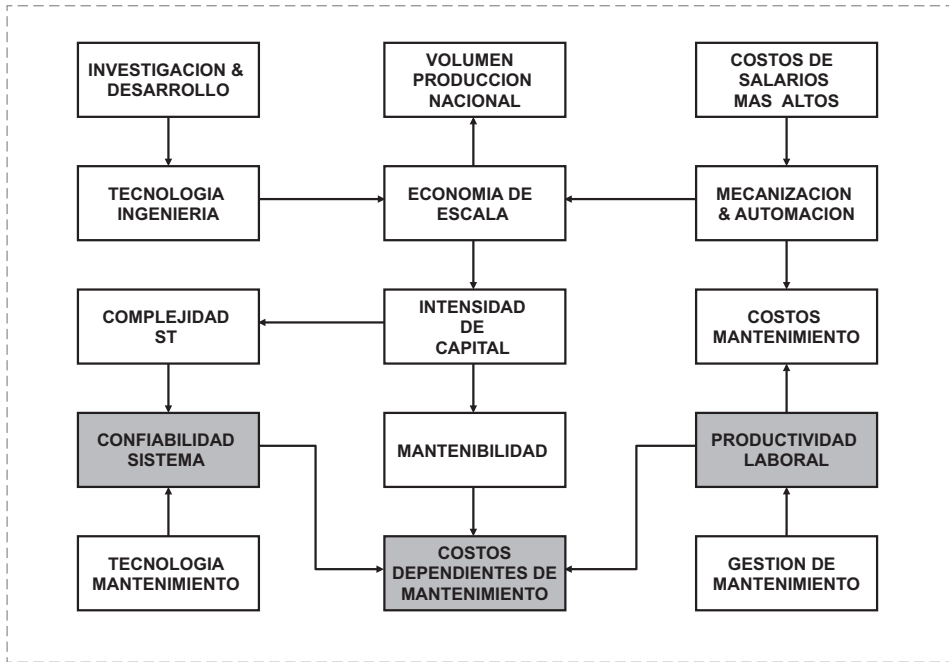


Figura 1.1: *Importancia del mantenimiento.*

Este crecimiento en escala es posible gracias a la utilización de nuevas tecnologías y técnicas, disponibles a través de la Investigación y Desarrollo (I+D).

Un aumento del volumen de producción nacional conduce a un aumento de prosperidad, un mayor ingreso per cápita y una mejora de las condiciones de trabajo, tales como la reducción de la jornada laboral y salarios más altos. En respuesta a la competencia, las empresas tratarán siempre de compensar el aumento de costos salariales a través de medidas técnicas, como la mecanización, sustitución del trabajo humano, automatización y sustitución del trabajo mental. La mecanización y la automatización de los sistemas técnicos dan como resultado una mayor productividad laboral, expresada en volumen de producción por año-hombre.

El aumento de escala de los sistemas técnicos conduce a un aumento de la intensidad de capital, por lo tanto a un mayor componente de costo fijo de la producción debido a un aumento de la depreciación. Los costos fijos determinan una gran parte de las pérdidas de ingresos debido a las pérdidas de producción relacionadas con el mantenimiento en otras palabras los costos dependientes de mantenimiento. Esto lleva por un lado a poner más énfasis en la restricción del número de averías técnicas a través del mantenimiento preventivo y la eliminación de mantenimiento a través del uso de la modificación, y por el otro lado, a la reducción del tiempo de parada de los ST para la corrección de averías. Una de las medidas para reducir los tiempos de parada necesarios para llevar a cabo el mantenimiento es mejorar la mantenibilidad de los sistemas técnicos (accesibilidad, inter

cambiabilidad, identificación de errores). A través de estas medidas, los costos dependientes de mantenimiento pueden ser restringidos.

Otra consecuencia del crecimiento de la economía de escala es el aumento de la complejidad de los sistemas técnicos expresada en el mayor número de piezas y componentes empleados, el creciente número de especializaciones técnicas para ejecutar el mantenimiento así como las dependencias mutuas entre ellos. Esta mayor complejidad a su vez exige la atención en la confiabilidad del sistema, con el fin de reducir el número de averías técnicas. Este es el área de enfoque de la tecnología de mantenimiento.

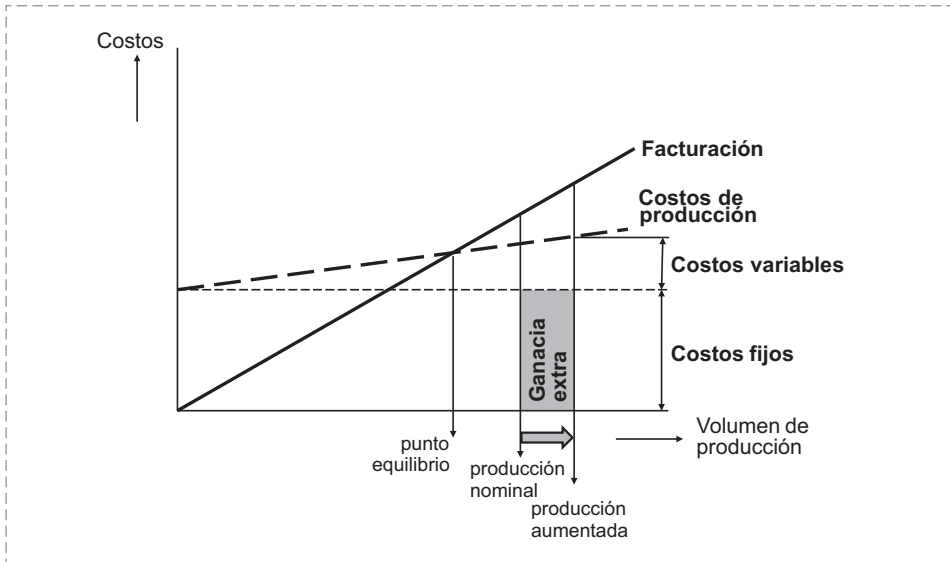
La ejecución del mantenimiento posee sobretodo una mano de obra intensiva, donde del 75-80% de los costos de mantenimiento son costos salariales. Esto es lo que hace que la gestión de mantenimiento sea muy importante, por ejemplo aumentando la productividad del trabajo del personal de mantenimiento a un nivel suficiente. Esto se logra a través de la planificación y programación destinada a limitar los tiempos de espera, de caminata y búsqueda y limitando las pérdidas de coordinación. Además de reducir los costos, la planificación y la programación también ayudan a limitar el tiempo de parada de los sistemas técnicos, y por lo tanto los costos dependientes de mantenimiento.

El nivel de los costos dependientes de mantenimiento está determinado por la demanda de producción. Si la capacidad de un Sistema Técnico no está utilizada, las pérdidas de producción pueden ser compensadas. En esta situación, los costos dependientes de mantenimiento se determinan por los costos adicionales necesarios para realizar las pérdidas de producción. En una situación donde la producción está totalmente ocupada, las pérdidas de producción significan pérdidas de ingresos y como consecuencia los costos dependientes de mantenimiento son considerablemente mucho más altos.

La influencia de la utilización de la capacidad de los ST, y por lo tanto los costos dependientes de mantenimiento, pueden ilustrarse utilizando un modelo simplificado, véase la figura 1.2.

En este modelo, las unidades monetarias se muestran en el eje vertical, y el volumen producido en este caso la utilización de la capacidad de los ST, en el eje horizontal. En el punto de intersección entre el volumen de ventas y los costos asociados de producción la rentabilidad se convierte en ganancia o pérdida. Este punto se conoce como el punto de equilibrio.

Los costos de producción se componen en parte de los costos fijos, es decir, los costos que (dentro de ciertos límites) permanecen los mismos cuando el volumen de producción cambia y los cuales deben ser pagados independientemente de su nivel de operación, es decir, se produzca o no se produzca. Los costos fijos consisten en lo siguiente: la depreciación de los activos fijos, los costos salariales de producción y los costos de mantenimiento. Los costos variables varían con el volumen de producción y consisten en los costos de materias primas y materiales auxiliares, así como del gasto del consumo de utilidades.



**Figura 1.2:** Utilización de la capacidad de los sistemas técnicos (ST).

La utilización de la capacidad nominal se determina por el volumen de producción, donde los costos fijos están cubiertos y un objetivo de ganancia predeterminado está realizado a través del volumen de ventas menos costos de producción.

Si se puede aumentar la producción mediante la reducción de los tiempos de parada relacionados con mantenimiento (por ejemplo, limitando la frecuencia y/o duración de los tiempos de parada para mantenimiento), la ganancia es incrementada por una mayor diferencia entre el volumen de venta y los costos variables. En segundo lugar, la ganancia se incrementa considerablemente por la cantidad de ingresos adicionales por encima de la producción nominal menos los costos variables necesarios (donde los costos fijos ya están cubiertos y suponiendo que una producción adicional se pueda vender). En otras palabras, se obtiene una ganancia adicional, equivalente al área sombreada. Esto significa que los costos dependientes de mantenimiento se pueden determinar a través de la diferencia entre el volumen de ingreso y los costos variables de la capacidad de producción que puede ser influenciada por el mantenimiento, suponiendo que el volumen producido, pueda, además ser vendido. Esto es conocido como el margen de contribución (MC). En empresas con alto grado de costos fijos, normalmente con una alta inversión de capital, la frecuencia y los tiempos de parada relacionados con mantenimiento de ST deben mantenerse lo más bajo posible. Esto quiere decir, que se requiere un alto nivel de confiabilidad y mantenibilidad de los sistemas técnicos.

En las empresas de capital intensivo, la utilización de la capacidad ST por encima o por debajo de la capacidad nominal de producción se traduce rápidamente en pérdidas o ganancias considerables. Por eso es vital tener una comprensión del punto de equilibrio, la capacidad nominal y la utilización real de la capacidad ST. También es esencial que se

conozca el alcance de cualquier impedimento impuesto por el mantenimiento sobre el potencial de la capacidad de producción.

La figura 1.1 muestra la relación entre complejidad y confiabilidad del ST. Esta relación es explicada con más detalle en la tabla 1.1. Uno de los factores determinantes de la complejidad de un sistema técnico es el número de piezas o componentes que conforman el sistema técnico.

La confiabilidad se define como la probabilidad de funcionamiento ininterrumpido durante un período determinado, en condiciones definidas. Si se asumen tres sistemas: uno que consiste de 10, uno de 100 y uno de 500 componentes. Para el resto, se asume que la confiabilidad de los componentes que forman los sistemas es igual.

También se asume que el porcentaje de averías de los componentes es constante y que una avería que se produzca en uno de los componentes no tiene ningún efecto sobre el porcentaje de averías de los otros componentes. De una avería en un componente, resulta una avería del sistema. En base a estos supuestos, la confiabilidad de los tres sistemas se puede calcular utilizando el producto de la confiabilidad de las componentes individuales.

**Tabla 1.1:** *Complejidad y confiabilidad del ST.*

Confiabilidad de los componentes	Confiabilidad del Sistema Técnico		
	Número de componentes del Sistema Técnico		
	10	100	500
0,98	0,817	0,133	0,000
0,999	0,990	0,905	0,606
0,9999	0,999	0,991	0,952

El cuadro 1.1 muestra que a medida que aumenta la complejidad, una baja confiabilidad de piezas crea rápidamente una baja e inaceptable confiabilidad del sistema. En una situación como esa, es esencial aumentar la confiabilidad de los componentes individuales encogiendo opciones de mejor calidad, con el fin de alcanzar una confiabilidad aceptable del sistema, o manteniendo la confiabilidad ejecutando mantenimiento preventivo en el nivel requerido. El desarrollo descrito anteriormente ha tenido lugar en el transcurso del tiempo, y todavía se aplica hoy en día. La confiabilidad de los componentes y partes aumenta en las generaciones posteriores, por lo que es posible que las nuevas generaciones de sistemas complejos ofrezcan a menudo una mayor confiabilidad, generando de este modo un requisito más bajo de mantenimiento que las generaciones anteriores de sistemas menos complejos. Con los automóviles, por ejemplo, se puede pensar en la enorme reducción en el número de visitas de garaje para las inspecciones de servicios y averías, dando como resultado unos costos más bajos de mantenimiento resultantes y, a la vez ofreciendo períodos más largos de garantía.

Como se dijo anteriormente en el § 1.2.2, los costos de mantenimiento se componen de los costos salariales para el personal propio de mantenimiento, los costos de repuestos y materiales utilizados, así como de los costos de utilización de terceros.

En muchas situaciones, el personal responsable de la producción u operaciones, tales como el personal operativo, los operadores o técnicos de producción o ingenieros pueden llevar a cabo también tareas de mantenimiento. Estas actividades se describen como mantenimiento de primera línea (MPL). En términos generales, los costos de mantenimiento de primera línea son desconocidos, debido a que no son registrados. En otras situaciones, el servicio de turno es cargado a la producción, como resultado de lo cuál los costos relacionados no se enumeran en el presupuesto de mantenimiento o los informes de costos.

Es una práctica común que no todas las tareas programadas de mantenimiento preventivo sean realmente ejecutadas. Cualquier tarea de mantenimiento preventivo no ejecutada o no ejecutada en el tiempo previsto debe ser vista como mantenimiento atrasado. Estos costos pueden ser calculados. Las consecuencias de las reparaciones llevadas a cabo en una etapa posterior y los costos adicionales resultantes y la ocurrencia de averías adicionales son difíciles de estimar.

Los costos dependientes de mantenimiento están determinados por las pérdidas de producción que pueden ser influenciadas por la función de mantenimiento. El valor de esos costos es igual a la diferencia entre la pérdida de ingresos y los costos variables, efectivamente el valor añadido.

Las pérdidas de producción relacionadas con mantenimiento son la consecuencia de:

- Paradas programadas y no programadas de un ST donde se lleva a cabo el mantenimiento.
- Pérdidas de capacidad o rendimiento (volumen de producción por unidad de tiempo  $\times$  duración) debajo de la capacidad estándar debido a una no condición óptima del ST.
- Costos de averías, rechazo, deshacer y/o rehacer de productos como consecuencia de un estado no óptimo del ST.

Una investigación sobre los costos totales de mantenimiento como suma de los costos de mantenimiento y los costos dependientes de mantenimiento realizada en líneas de ensamblaje complejo de bombillas produjo el siguiente cuadro (Smit, 1983). En la tabla 1.2, los costos relacionados con mantenimiento se expresan como un porcentaje de los costos de mantenimiento anual promedio durante un período de 5 años en una serie de líneas de producción.

Esta tabla revela que el mantenimiento de primera línea en esta situación representa una proporción importante de los costos totales de mantenimiento, equivalente a no menos del 75% de los costos anuales de mantenimiento. Esto incluye tareas tales como limpieza, lubricación diaria, inspecciones, ajustes y reparaciones menores, la corrección de las averías de menor importancia y la observación del comportamiento del sistema...

**Tabla 1.2:** *Costos totales de mantenimiento para líneas de ensamblaje de bombillas.*

<b>COSTOS RELACIONADOS CON MANTENIMIENTO</b>	
COSTOS PROMEDIOS ANUALES DE MANTENIMIENTO	100%
Costos de mantenimiento de primer nivel	75%
<b>COSTOS DEPENDIENTES DE MANTENIMIENTO</b>	
Costos ed parada relacionados con mantenimiento	45%
Perdidas de calidad y capacidad relacionadas con mantenimiento	65%
<b>COSTOS TOTALES RELACIONADOS CON MANTENIMIENTO</b>	<b>285%</b>

Los costos dependientes de mantenimiento como resultado de los tiempos de parada de mantenimiento programado y no programado se determinan por los costos de las pérdidas de producción en las líneas. En este caso, estas pérdidas fueron relativamente limitadas debido a que durante el período de observación, la capacidad de las líneas fue subutilizada. Los costos dependientes de mantenimiento para paradas relacionadas con mantenimiento fueron equivalentes al 45% de los costos medios anuales de mantenimiento.

Los costos dependientes de mantenimiento de capacidad y pérdidas de calidad, como consecuencia de las desviaciones en el estado de las líneas de producción son equivalentes a 65% de los costos medios anuales de mantenimiento. Los costos totales de mantenimiento, no visibles equivalen a casi el doble (185%) de los costos medios anuales de mantenimiento. No obstante, los costos relacionados con mantenimiento casi nunca se conocen de forma explícita, ya que se ocultan en los costos de producción (para el mantenimiento por parte del personal de producción en los costos salariales de producción), en la depreciación (por capacidad de producción adicional para compensar las pérdidas de producción relacionadas con el mantenimiento) y los costos de los productos (por el rechazo, el deshacer y/o rehacer de los productos). Como consecuencia, en la situación investigada, los costos totales de mantenimiento fueron casi tres veces el valor del costo actual de mantenimiento.

En muchas situaciones, la escala de los costos relacionados con mantenimiento es tal que sería claramente deseable registrar e informar sobre esos costos. Por regla general, el registro de la producción no está equipado para informar sobre el mantenimiento de primera línea. Las pérdidas de producción a menudo se registran, pero en muchos casos, la atribución de acuerdo a la responsabilidad (en este caso el mantenimiento) no tiene lugar. Las pérdidas de producción relacionadas con mantenimiento casi nunca se presentan en forma de costos dependientes de mantenimiento. En términos generales, la administración de la empresa no es capaz de proporcionar los cargos de parada de los sistemas técnicos primarios.

El mantenimiento atrasado como consecuencia de la postergación y, a veces incluso la cancelación del mantenimiento preventivo es otra forma de costos no visibles relacionados con mantenimiento. Dicho mantenimiento atrasado generalmente ocurre gra-